

L'INTÉGRATION DE L'ÉCO-CONCEPTION DANS LES PROJETS  
D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT SUR RAIL

Par  
Camille Crutel

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable  
en vue de l'obtention du double diplôme de maîtrise en environnement et de Master en Ingénierie et  
Management de l'Environnement et du Développement Durable (M. Env. - IMEDD)

Sous la direction de Monsieur Florian Bratec

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES

Septembre 2018

## SOMMAIRE

Mots clés : éco-conception, approche cycle de vie, impacts environnementaux, mobilité durable, transport sur rail, infrastructures ferroviaires, bâtiment durable, retours d'expérience, innovation, aide à la décision

L'objectif est de développer une méthodologie pour la création d'un outil d'aide à la décision en éco-conception dédié aux projets de bâtiments et d'infrastructures linéaires dans le secteur de la mobilité sur rail (trains urbains et grandes lignes, métros et tramways). Ainsi, cet essai cherche à faciliter l'intégration des aspects environnementaux dans le processus de conception, notamment à travers l'accompagnement des maîtres d'ouvrages et des chefs de projets et la valorisation de retours d'expérience pertinents.

Pour ce faire, il est tout d'abord démontré l'intérêt de considérer l'ensemble du cycle de vie et les différentes catégories d'impact dans la comparaison des différents moyens de transport (et non uniquement les émissions de gaz à effet de serre en phase d'exploitation), mais également d'inclure dans l'évaluation environnementale les infrastructures dont ils dépendent directement, tels que les routes, voies ferrées, gares et aéroports. En effet, l'étalement urbain et l'accroissement de la mobilité au cours des dernières décennies a placé l'usage des transports au cœur de nos modes de vie moderne. L'augmentation constante des flux de déplacements conduit notamment à la nécessité de développer toujours plus d'infrastructures, dont la construction et l'exploitation ne sont pas sans présenter de nombreux impacts environnementaux directs et indirects, pourtant rarement considérés dans les études comparatives du secteur des transports. Pour tenter de réduire les pressions exercées par les bâtiments et les infrastructures de transport sur rail sur la disponibilité des matières premières et des énergies fossiles, la biodiversité, la ressource en eau, la qualité de l'air et les changements climatiques, des solutions sont ensuite apportées pour intégrer l'environnement dans la conception et sur l'ensemble du cycle de vie. Enfin, la méthodologie utilisée pour l'élaboration d'un outil d'aide à la décision en éco-conception propre au secteur de la conception d'infrastructures linéaires est exposée. Celui-ci s'inscrit dans un projet de Recherche & Développement mené dans le cadre d'un stage-intervention au sein de Systra, une ingénierie ferroviaire française à rayonnement international. Cette première ébauche d'outil tend à devenir par la suite un logiciel utilisé par les chefs de projets puis les chargés éco-conception en vue d'une intégration systématique de solutions de conception durable, dès les premières phases de conception et sur l'ensemble de leurs projets de mobilité.

Pour conclure, cet essai met en évidence la part des infrastructures dans le résultat de l'évaluation environnementale des transports linéaires sur rail, mais également l'importance de considérer et de réduire leurs impacts dès leur conception. Des exemples de solutions d'éco-conception pertinentes sont apportés, démontrant ainsi la possibilité de concevoir autrement, en réduisant les pressions exercées sur l'environnement. Enfin, la méthodologie exposée permet de comprendre pourquoi et comment développer une méthode d'aide à la décision en éco-conception propre au secteur des transports ferrés.

## REMERCIEMENTS

La réalisation de cet essai a été possible grâce à plusieurs personnes auxquelles je souhaite exprimer ma gratitude.

Je tiens à remercier en premier lieu ma maîtresse de stage, **Déborah Rondet-Philipp**, directrice du département d'Ingénierie Environnementale et Durable (IED) de Systra, pour m'avoir permis de rejoindre leur équipe et pour m'avoir fait confiance au quotidien au cours d'un stage-intégration de six mois, et **Christelle Chichignoud**, responsable du Pôle Ile-de-France, pour son suivi régulier et son soutien.

J'adresse mes remerciements à **Maxime Baumann**, chargé d'éco-conception à IED, pour sa disponibilité et son aide précieuse dans la rédaction de cet essai, ainsi que pour sa transmission de connaissances et son appui dans mes diverses missions de stage.

Je remercie le **département Innovation de Systra**, avec qui j'ai travaillé sur ce projet de création d'un outil d'aide à la décision en éco-conception, pour leur motivation et leur bonne humeur.

Je souhaite également adresser ma reconnaissance à toutes les personnes que j'ai rencontrées chez Systra au cours de mon stage et qui m'ont éclairé sur le sujet de la conception ferroviaire.

Merci à **Florian Bratec** pour avoir accepté de diriger mon essai, et plus largement pour les connaissances et l'expertise qu'il m'a apporté pendant ses cours d'éco-conception à l'Université de Technologie de Troyes.

Enfin, je remercie infiniment toutes les personnes qui ont contribué à cet essai en m'accordant leur temps pour une ou plusieurs relectures et qui m'ont apporté leurs commentaires constructifs.

Je termine avec une pensée pour la promotion 2017-2018 du double diplôme M.Env. – IMEDD, qui s'est illustrée par sa capacité d'entraide et de partage des ressources, ainsi qu'à mes anciens camarades de l'Université de Sherbrooke. Je vous souhaite à tous de réussir dans vos projets et de vous épanouir dans vos vies personnelles et professionnelles.

*« The most neglected issue in sustainable design today is that our institutions —including the design professions— are not designed to collaborate toward solving the large, systemic problems that threaten human survival. »*

Slim Van der Ryn, pionnier du Green Design

## PRÉFACE

Le présent livrable s'inscrit dans le cadre d'un stage-intervention de six mois au sein du bureau d'ingénierie Systra, à Paris, pour valider la maîtrise en environnement (M. Env.) de l'Université de Sherbrooke (Canada), en double-diplôme avec l'Université de Troyes (France).

Conformément à l'échéancier défini par l'Université, le sujet de cet essai a été adopté en amont de l'intégration dans l'entreprise, en lien avec le sujet de stage déterminé en entretien et sur la convention. Il a donc été choisi que l'essai porterait sur un projet de Recherche & Développement initié par le département Ingénierie Environnementale et Durable (IED), visant à développer un outil logiciel d'analyse multicritère contextualisé pour l'aide à la décision en éco-conception dans les missions de conseils.

Au moment du rendu de cet essai, le logiciel n'est pas finalisé, l'objet principal de ce stage étant focalisé sur le développement méthodologique de la conception de l'outil. Cet essai présente donc cette méthodologie en son état d'avancement. En plus du caractère ambitieux du projet et de la durée limitée du stage-intervention, plusieurs facteurs expliquent un avancement plus lent qu'il l'avait été anticipé au début de la rédaction.

D'une part, plusieurs arrivées et départs de collaborateurs de l'équipe projet ont nécessité de faire des allers-retours dans les étapes du projet. En effet, il était important que chacun se réapproprie les objectifs de l'outil et puisse apporter sa vision. Également, s'agissant d'un projet de R&D spécifique aux activités de Systra, il n'existait pas de méthode sur laquelle s'appuyer. Plusieurs « fausses routes » ont ainsi été explorées et ne seront pas exposées ici, dans un souci de pertinence et de synthétisme, mais l'ensemble de ces choix stratégiques pourraient faire l'objet d'une autre publication, en interne pour Systra à des fins de retours d'expérience, ou à titre personnel dans le but d'approfondir le sujet de cet essai. Ainsi, bien que l'élaboration de la méthodologie de l'outil ait été plus longue que prévu, le logiciel final n'en sera que plus performant.

D'autre part, le départ du seul responsable éco-conception de l'entreprise a conduit à une sollicitation forte sur les missions d'éco-conception au cours du stage, réduisant ainsi le temps de charge dédié au développement de l'outil. Cependant, ces missions de conseil et d'évaluation ont été très formatrices pour la compréhension des enjeux, du fonctionnement d'un bureau d'étude et plus largement des spécificités du secteur de la conception des infrastructures de transport.

Il convenait également de noter dans cette préface que le développement de l'outil sera poursuivi après le rendu de cet essai, grâce à une embauche en Contrat à Durée Indéterminée sur les sujets d'éco-conception pour faire suite au stage de fin d'études.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. L'INTÉGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LA CONCEPTION DE PROJETS DE MOBILITÉ	4
1.1 Enjeux du secteur des transports sur rail.....	4
1.1.1 Le secteur des transports collectifs en France .....	5
1.1.2 Les déplacements sur réseau ferré : un impact moindre sur l'environnement ?.....	6
1.1.3 L'Analyse du Cycle de Vie des différents moyens de transport.....	8
1.1.4 Le Bilan Carbone® de la Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône.....	10
1.1.5 Les impacts environnementaux des transports sur rail.....	12
1.2 Entreprendre une démarche d'éco-conception.....	14
1.2.1 L'intégration de l'environnement en phase conception.....	15
1.2.2 L'intégration de l'environnement en phase travaux.....	15
1.2.3 L'intégration de l'environnement en phase exploitation.....	16
1.3 Exemples de projets d'éco-conception d'infrastructures linéaires de transport sur rail.....	16
1.3.1 Eco-gares.....	16
1.3.2 Site de maintenance et de remisage.....	17
1.3.3 Ligne à grande vitesse.....	18
1.4 Synthèse.....	19
2. LES SOLUTIONS D'ÉCO-CONCEPTION DE PROJETS D'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRES...	20
2.1 Recommandations générales.....	20
2.1.1 Intégrer un critère carbone.....	21
2.1.2 Favoriser le matériau bois.....	21
2.1.3 Utiliser des matériaux biosourcés.....	22
2.1.4 Réduire les besoins énergétiques et produire de l'énergie renouvelable.....	22
2.1.5 Limiter la consommation d'eau.....	24
2.1.6 Recycler les matériaux.....	25
2.2 Solution d'éco-conception n°1 : le « béton vert » .....	26

2.2.1	Avis technique.....	27
2.2.2	Avis environnemental.....	28
2.2.3	Avis économique.....	28
2.2.4	Exemple et retour d'expérience.....	28
2.3	Solution d'éco-conception n°2 : le soutènement des quais par un mur en gabion.....	29
2.3.1	Avis technique.....	30
2.3.2	Avis environnemental.....	30
2.3.3	Avis économique.....	31
2.3.4	Exemple et retour d'expérience.....	31
2.4	Solution d'éco-conception n°3 : la végétalisation des plateformes de tramway.....	31
2.4.1	Avis technique.....	33
2.4.2	Avis environnemental.....	34
2.4.3	Avis économique.....	34
2.4.4	Exemple et retour d'expérience.....	34
2.5	Solution d'éco-conception n°4 : la conception de halte éco-durable.....	35
2.5.1	Avis technique.....	37
2.5.2	Avis environnemental.....	37
2.5.3	Avis économique.....	38
2.5.4	Exemple et retour d'expérience.....	38
2.6	Solution d'éco-conception n°5 : le supercondensateur.....	39
2.6.1	Avis technique.....	40
2.6.2	Avis environnemental.....	40
2.6.3	Avis économique.....	41
2.6.4	Exemple et retour d'expérience.....	41
2.7	Solution d'éco-conception n°6 : les quais solaires.....	41
2.7.1	Avis technique.....	42
2.7.2	Avis environnemental.....	43
2.7.3	Avis économique.....	43

2.7.4	Exemple et retour d'expérience.....	43
2.8	Solution d'éco-conception n°7 : la culture de micro-algues en façade de bâtiments.....	44
2.8.1	Avis technique.....	45
2.8.2	Avis environnemental.....	46
2.8.3	Avis économique.....	46
2.8.4	Exemple et retour d'expérience.....	47
2.9	Synthèse des solutions.....	48
3.	CRÉATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DÉCISION EN ÉCO-CONCEPTION.....	50
3.1	Objectifs de l'outil.....	50
3.1.1	Répondre au besoin des chefs de projet.....	51
3.1.2	Outil de retour d'expérience sur les initiatives d'éco-conception de Systra.....	51
3.1.3	Promouvoir l'éco-conception au sein du bureau d'études.....	52
3.2	Méthodologie de l'outil.....	52
3.2.1	Création d'une base de données interne : l'Écothèque.....	53
3.2.2	Déterminer les différentes composantes d'un projet de mobilité sur rail.....	57
3.2.3	Fonctionnement de l'outil.....	61
3.2.4	Limites de la méthodologie de l'outil.....	62
3.2.5	Etat d'avancement et perspectives de l'outil.....	63
3.2.6	Faiblesses et menaces de l'outil.....	64
	CONCLUSION.....	66
	RÉFÉRENCES.....	68
	ANNEXE 1.....	77

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Émissions de CO <sub>2</sub> des transports de passagers urbains et périurbains .....	6
Figure 1.2	Émissions de CO <sub>2</sub> des transports de passagers sur des distances nationales .....	7
Figure 1.3	Étapes considérés dans une ACV .....	8
Figure 1.4	Consommation d'énergie et émissions de GES des transports .....	9
Figure 1.5	Halte « écodurable » à Gravigny-Balizy .....	16
Figure 1.6	Avant/après du projet d'intégration urbaine du SMR de Ladoumègue .....	17
Figure 2.1	Émissions de gaz à effet de serre des différentes industries et zoom sur l'industrie de la construction .....	26
Figure 2.2	Mur en gabions multifonctionnel.....	27
Figure 2.3	Murs en gabions sur le parking de la gare de Vitrolles (1) .....	31
Figure 2.4	Murs en gabions sur le parking de la gare de Vitrolles (2) .....	31
Figure 2.5	Plateforme végétalisée de la ligne T1 du Tramway de Caen.....	32
Figure 2.6	Halte éco-durable.....	35
Figure 2.7	Halte éco-durable (1) .....	36
Figure 2.8	Halte éco-durable (2) .....	36
Figure 2.9	Halte éco-durable de Niederbronn-les-Bains (1) .....	38
Figure 2.10	Halte éco-durable de Niederbronn-les-Bains (2) .....	38
Figure 2.11	Revêtement solaire sur les quais de la gare de Grasse .....	43
Figure 2.12	Les quatre étapes du système de façades à micro-algues d'Ennessys.....	44
Figure 2.13	Les bâtiments du projet In Vivo à Paris.....	47
Figure 3.1	Page d'accueil de l'Écothèque.....	53
Figure 3.2	Onglet « Énergie » .....	54
Figure 3.3	Onglet « Processus » .....	55
Figure 3.4	Fiche solution d'éco-conception « Géothermine et Géocooling ».....	56
Figure 3.5	Modélisation des mesures d'écologie dans l'architecture du classement des objets.....	57
Figure 3.6	Premier niveau de l'architecture de classement des objets.....	58



Figure 3.7	Second niveau de l'architecture de classement des objets.....	58
Figure 3.8	Troisième niveau de l'architecture de classement des objets.....	59
Figure 3.9	Solutions d'éco-conception.....	60
Figure 3.10	Solutions d'éco-conception pour les quais des plateformes de tramway.....	62
Tableau 1.1	Évolution des réseaux.....	5
Tableau 1.2	Synthèse des émissions de la LGV Rhin-Rhône.....	11
Tableau 2.1	Légende de l'analyse multicritère des solutions d'éco-conception.....	20
Tableau 2.2	Analyse multicritère de l'utilisation de béton vert.....	27
Tableau 2.3	Analyse multicritère du soutènement de quais par un mur en gabion.....	30
Tableau 2.4	Analyse multicritère de la végétalisation des plateformes de tramway.....	33
Tableau 2.5	Analyse multicritère de la halte éco-durable.....	37
Tableau 2.6	Analyse multicritère du supercondensateur.....	39
Tableau 2.7	Analyse multicritère des quais solaires.....	42
Tableau 2.8	Analyse multicritère de la culture de micro-algues en façade de bâtiments.....	45
Tableau 2.9	Synthèse des solutions d'éco-conception.....	48

## **LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES**

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
DD	Développement Durable
GES	Gaz à effet de Serre
IED	Ingénierie Environnementale et Durable
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
RER	Réseau Express Régional
RSE	Responsabilité Sociétale de l'Entreprise
SIG	Système d'Information Géographique
TER	Train Express Régional
TGV	Train à Grande Vitesse

## LEXIQUE

Analyse du Cycle de Vie	« L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui se dit Life Cycle Analysis (LCA) en anglais, est une évaluation des effets directs ou indirects d'un produit sur l'environnement, depuis l'extraction des matières premières qui entrent dans sa composition jusqu'à son élimination. Selon l'ISO [Organisation internationale de normalisation], l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est la "Compilation et évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières, et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, ou un procédé, ou un service, sur la totalité de son cycle de vie". » (Actu Environnement, 2012)
Bâtiment tertiaire	« Le tertiaire dans le bâtiment correspond aux bâtiments occupés par les activités du secteur tertiaire (commerces, bureaux, santé, enseignement, infrastructures collectives destinées aux sports, aux loisirs, aux transports, CHR - cafés/hôtels/restaurants -, et tous les E.R.P - établissements destinés à recevoir du public. » (Clima Maison, s. d.)
Développement Durable	Selon la définition du rapport Brundtland de 1987, le développement durable est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. » La notion de développement durable a été officialisée en 1992 lors du Sommet de la Terre de Rio comme « un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable ». (Institut National de la Statistique et des Études Économiques [INSEE], 2016)
Éco-conception	« L'éco-conception consiste à intégrer la protection de l'environnement dès la conception des biens ou services. Elle a pour objectif de réduire les impacts environnementaux des produits tout au long de leur cycle de vie : extraction des matières premières, production, distribution, utilisation et fin de vie. Elle se caractérise par une vision globale de ces impacts environnementaux : c'est une approche multiétape (prenant en compte les diverses étapes du cycle de vie) et multicritère (prenant en compte les consommations de matière et d'énergie, les rejets dans les milieux naturels, les effets sur le climat et la biodiversité). » (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016a)

Empreinte carbone	« L'empreinte carbone, ou inventaire des gaz à effet de serre d'un produit (bien ou service), compile la somme des flux entrants et sortants associés aux différentes étapes du cycle de vie d'un produit pour ensuite en évaluer l'impact potentiel sur les changements climatiques. En d'autres termes, l'empreinte carbone représente la somme des GES émis tout au long du cycle de vie du produit. » (Empreinte Carbone Québec, s. d.)
Maître d'œuvre	« Le maître d'œuvre est la personne physique ou morale, publique ou privée, qui, en raison de sa compétence technique, est chargée par le maître de l'ouvrage ou son mandataire, afin d'assurer la conformité architecturale, technique et économique de la réalisation du projet objet du marché, de diriger l'exécution des marchés de travaux, de lui proposer leur règlement et de l'assister lors des opérations de réception ainsi que pendant la période de garantie de parfait achèvement. » (Cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics de travaux, 2009)
Maître d'ouvrage	« Le maître de l'ouvrage est la personne morale pour le compte de laquelle les travaux sont exécutés. [...] Il lui appartient, après s'être assuré de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération envisagée, d'en déterminer la localisation, d'en définir le programme, d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus selon lequel l'ouvrage sera réalisé et de conclure, avec les maîtres d'œuvre et entrepreneurs qu'il choisit, les contrats ayant pour objet les études et l'exécution des travaux. » (Loi relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'oeuvre privée)
Modes doux	« Les transports doux [ou modes doux] caractérisent tous les modes de transports sans moteurs, qui ne génèrent pas de pollution ou de gaz à effet de serre. » Ainsi, sont considérés comme des modes doux : la marche à pied, le vélo, le roller, la planche à roulettes (skate-board), ... (Vedura, s. d.)

## INTRODUCTION

L'émergence de préoccupations environnementales, notamment en lien avec l'exploitation soutenue de ressources limitées non renouvelables, l'augmentation de la production de déchets et les incidences des changements climatiques, a mis en lumière la nécessité de considérer le développement durable dans les processus de conception de biens et de services.

Les premières initiatives d'intégration de l'environnement dans la conception de produits apparaissent dans les années 70, principalement pour tenter de réduire la quantité de déchets envoyés sur les sites d'enfouissement. Au cours de la décennie suivante se développent des outils d'évaluation des impacts environnementaux de biens ou d'activités, parmi lesquels on retiendra principalement l'Analyse du Cycle de Vie qui est reconnue comme la méthodologie la plus fiable pour la quantification des impacts (Centre National de la Recherche Scientifique [CNRS], 2015). L'ACV, aujourd'hui encadrée par les normes environnementales ISO 14 040 et 14 044, est devenue l'outil de référence pour l'évaluation des impacts environnementaux. (Ademe, 2008)

Conceptualisée au niveau international en 2002 à travers la norme ISO 14062 « Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit », l'éco-conception se définit comme une démarche d'amélioration continue qui vise à « intégrer des caractéristiques environnementales dans la conception du produit en vue d'améliorer la performance environnementale du produit tout au long de son cycle de vie. » (Ademe, 2018a) Il s'agit d'un processus d'innovation consistant à reconcevoir des biens et services en vue de diminuer leurs impacts sur l'ensemble du cycle de vie (de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie) (Orée, s. d.), en considérant par exemple le choix des matériaux, les procédés de fabrication, l'usage ou l'élimination du produit.

Ainsi, l'éco-conception désigne une démarche, qui a recours à de nombreuses méthodes, telles que l'éco-innovation, la créativité, l'optimisation des procédés et des matières et l'Analyse du Cycle de Vie par exemple. Pour mettre en œuvre ces méthodes, il est possible de s'appuyer sur de nombreux outils, comme des guides, des logiciels (comme SimaPro, Gabi, ou ELODIE utilisé dans le secteur du bâtiment) ou encore la norme NF X30-264, publiée en 2013, qui s'impose comme le document de référence de mise en place de la démarche.

Les entreprises tendent aujourd'hui de plus en plus à mener des démarches d'éco-conception de leurs produits. On constate une transition progressive depuis les années 50, d'une approche site à travers des mesures environnementales curatives puis préventives, à une approche produit grâce à l'éco-conception (Pôle éco-conception, s. d.). Principalement contraintes par les évolutions normatives et réglementaires, les entreprises trouvent également leur intérêt dans l'élaboration de démarches volontaires d'éco-conception.

Il s'agit en effet d'une stratégie efficace de diversification sur un marché concurrentiel et qui conduit généralement à une réduction des coûts de production, voire à une augmentation des marges (Pôle éco-conception et Institut de développement de produits, 2014). Une démarche d'éco-conception est également pertinente pour stimuler la créativité des salariés et générer de l'innovation. En outre, cela permet d'anticiper les évolutions de la réglementation, de répondre aux attentes des consommateurs, de plus en plus regardants sur la qualité environnementale des produits qu'ils achètent, et d'améliorer l'image que leur renvoie l'entreprise. Ainsi, l'éco-conception allie protection de l'environnement, renforcement de l'intérêt des salariés et compétitivité économique.

À travers le développement de la mobilité collective, Systra participe déjà à la réduction des pollutions et de l'empreinte carbone des déplacements humains. Faisant partie des leaders mondiaux de la conception des infrastructures de transport urbain et ferroviaire, Systra est un groupe de conseil et d'ingénierie créé en 1957, qui compte aujourd'hui plus de 6100 collaborateurs et est présent dans plus de 80 pays dans le monde. En 2012, l'entreprise fusionne avec INEXIA et XELIS. Poursuivant son but de renforcer son rôle dominant dans la mobilité collective, Systra enregistre en 2016 un chiffre d'affaire de 612 milliards d'euros. (Systra, s. d.)

Pour accroître la prise en compte du développement durable dans les projets de l'entreprise, le Département d'Ingénierie Environnementale et Durable de Systra souhaite développer les missions d'éco-conception notamment à travers la conception d'un outil d'aide à la décision, à destination des chefs de projet, qui regroupe sur une même plateforme en ligne des solutions d'éco-conception sur des thématiques variées (empreinte carbone, énergie, matériaux, biodiversité, eau, déchets, etc.) afin de faire valoir les retours d'expérience du bureau d'étude, de mettre en valeur des procédés innovants et d'aider ses clients à prendre des décisions selon l'orientation qu'ils souhaitent donner à leur projet.

S'il existe aujourd'hui plusieurs outils d'aide à la décision en éco-conception, il convient de rappeler qu'il n'existe pas de démarche type ou de préconisations universelles pour les entreprises et organismes de tous secteurs. Il revient à chaque entreprise de définir ses besoins et ses objectifs et d'adapter son processus de conception en fonction de son mode d'organisation et des biens et services produits (Les cahiers du Développement Durable, s. d.). C'est pourquoi Systra souhaite développer un outil qui lui est propre dans l'aide à la décision en éco-conception pour ses projets de mobilité.

Ainsi, cet essai cherche à répondre à la question suivante : « comment intégrer les aspects environnementaux dans le processus de conception des projets de transport ? » Il s'agit également de se demander comment faire valoir les retours d'expérience de Systra auprès de ses chefs de projets, maîtres d'ouvrages, concepteurs, commerciaux et organismes certificateurs.

Dans le cadre de cet essai et de l'élaboration de la première version de l'outil, le périmètre d'étude sera restreint au cœur de métier de Systra : la conception d'infrastructures linéaires de transport sur rail, c'est à

dire « l'ensemble des installations fixes nécessaires à la circulation des véhicules et au fonctionnement du transport » (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016). Cela comprend donc les routes, voies ferrées et infrastructures telles que les gares, sous-stations, sites de maintenance et de remisage, ... nécessaires au bon fonctionnement des transports sur rail : Train à Grande Vitesse (TGV), Train Express Régional (TER), Réseau Express Régional (RER), métro et tramway. L'éco-conception des véhicules n'est donc pas comprise dans le champ de l'étude puisque leur conception ne relève pas des missions principales de Systra. Quant au périmètre géographique, il se limite aux projets d'implantation d'infrastructures en France. Cependant, les retours d'expérience de projets internationaux pourront être exploités lorsqu'il s'agit d'initiatives reproductibles sur le territoire français.

L'objectif premier de l'essai est de développer une méthodologie de création d'un outil d'aide à la décision en éco-conception, et plus spécifiquement dans le secteur des transports urbains et ferroviaires. Dans ce but, ce travail de recherche devra également répondre à plusieurs objectifs secondaires. Ainsi, il vise à démontrer l'intérêt d'intégrer les aspects environnementaux dans le processus de conception des infrastructures de transport et à exposer les différentes solutions d'éco-conception, qu'elles soient expérimentales ou sur lesquelles il est possible de faire valoir un retour d'expérience.

Les informations contenues dans cet essai proviennent de sources variées. Une partie d'entre elles est tirée des documents internes de Systra, tels que des guides, livrables de projets ou encore des discussions avec des personnes expertes de leur domaine. Pour compléter, des ressources provenant d'internet ont été utilisées. Un soin tout particulier a été apporté à la sélection des sources, tant statistiques que scientifiques, afin d'en assurer la qualité. L'attention a notamment été portée sur la fiabilité de la source et la réputation de ses auteurs, l'objectivité avec laquelle les informations sont traitées et leur actualisation. Ainsi, la documentation utilisée provient principalement de la littérature scientifique et d'organisations reconnues dans le secteur du Développement Durable (DD) et de l'éco-conception, telle que l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le Ministère de la Transition écologique et solidaire (anciennement ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer) ou encore le Pôle Éco-conception.

Pour parvenir à répondre à la problématique initiale, l'essai se découpe en trois parties. La première section s'intéresse plus particulièrement à l'éco-conception du secteur de la mobilité. Elle présente les enjeux et les leviers de l'intégration de l'environnement dans le processus de conception des infrastructures de transports. Le second chapitre expose un échantillon de solutions techniques d'éco-conception qu'il est possible d'appliquer à des projets de conception dans le secteur des transports, tant sur les infrastructures que sur les bâtiments. Une analyse multicritère permet d'évaluer ces solutions sur le plan technique, environnemental et économique. Enfin, la dernière partie de l'essai est consacrée aux objectifs et à la méthodologie de conception d'un outil d'aide à la décision en éco-conception.

## **1. L'INTÉGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LA CONCEPTION DE PROJETS DE MOBILITÉ**

Face aux préoccupations environnementales grandissantes, le secteur des transports se démarque par sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, mais également par sa capacité à se réinventer pour intégrer les enjeux de développement durable dans la façon dont les Hommes se déplacent. Il est moteur d'innovation et encourage la mobilité tout en cherchant à maîtriser ses externalités négatives sur le réchauffement climatique, les écosystèmes et le bien être humain.

### **1.1 Enjeux du secteur des transports sur rail**

C'est au cours de la révolution industrielle qu'apparaissent les prémices du réseau ferroviaire français. L'élaboration d'une « charte des chemins de fer » conduit à la construction d'un réseau en étoile depuis Paris, qui n'aura de cesse de s'étendre depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle jusqu'à la création de la SNCF en 1938. Le développement routier poussera ensuite l'entreprise publique à supprimer de nombreuses voies d'intérêt local ou secondaire. Quant au tramway moderne, celui-ci émerge suite au choc pétrolier de 1973 dans plusieurs grandes villes de France, notamment à Nantes et Grenoble, villes pionnières. Le premier métro français naît à Paris en 1900 et connaît un développement et une expansion rapide pour répondre aux enjeux de la croissance de la banlieue parisienne. Lyon et Marseille seront les premières villes de province à posséder un métro. On dénombre aujourd'hui six villes françaises équipées d'au moins une ligne. (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016).

Exacerbé par l'étalement urbain et le développement de la mobilité, l'usage des transports est aujourd'hui au cœur de nos modes de vie. Selon une enquête commandée par Ile-de-France Mobilité et la Direction régionale et interdépartementale de l'équipement et de l'aménagement (DRIEA), un francilien réalise en moyenne près de quatre déplacements par jour sur une portée de 4,4 km. En 2010, le nombre de déplacements quotidiens en Ile-de-France s'élevait à 41 millions, principalement dans le cadre de trajets reliant le domicile au lieu de travail, d'études et de loisirs. (Omnil, 2012) La démocratisation de l'accès aux voyages par l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages et la réduction des prix des transports a également participé à augmenter le flux des déplacements interrégionaux, voire internationaux.

Si la mobilité peut être considérée comme source de développement économique et de liberté, le développement des transports n'est pas sans s'accompagner de nombreuses externalités négatives sur l'environnement : consommation d'énergie (souvent d'origine fossile et/ou nucléaire) et de matières premières, émissions de pollution et de gaz à effet de serre (GES), perturbations de la biodiversité, etc. Le secteur des transports est notamment devenu le premier poste d'émissions de GES en France, puisqu'il représente près de 30% du total des émissions nationales, et contribue pour 40% des émissions de CO<sub>2</sub> à lui seul (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2017a). Ainsi, l'intégration de l'environnement dans le processus de conception des infrastructures de transport est l'un des principaux enjeux de développement durable du XXI<sup>ème</sup> siècle.



### 1.1.1 Le secteur des transports collectifs en France

En 2017, le seul secteur des transports représentait 16,7% du Produit Intérieur Brut (PIB) français avec des dépenses (principalement publiques) de 360 milliards d'euros. Plus des trois quarts des investissements étaient consacrés à la route, le quart restant étant partagé à parts presque égales entre le ferroviaire, les transports urbains et la navigation fluviale et maritime. Le réseau ferroviaire exploité par la SNCF compte aujourd'hui 29 000 kilomètres de voies ferrées. On constate une diminution de la longueur du réseau de 9% entre 1995 et 2015, malgré la construction de près de 1 000 kilomètres de Lignes à Grande Vitesse. En ce qui concerne le transport urbain, 64% du réseau utilise des infrastructures ferrées (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016). Les lignes de métros et de tramways se sont largement développées en deux décennies, notamment en province. (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017)

**Tableau 1.1 Évolution des réseaux** (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017)

En km

	1995	2000	2005	2010	2015
Routes <sup>1</sup>	962 407	989 096	991 165	1 050 117	1 088 747
Voies ferrées exploitées par la SNCF	31 940	31 397	30 871	30 335	28 987
dont trains d'Île-de-France	nd	nd	nd	920	850
Métro, RER, tramways	nd	nd	1 182	1 444	1 658
Métro, RER et tramways Île-de-France <sup>2</sup>	nd	nd	829	855	913
Métro et tramways de province <sup>3</sup>	181	269	353	589	745
Véloroutes et voies vertes	nd	nd	nd	nd	11 500

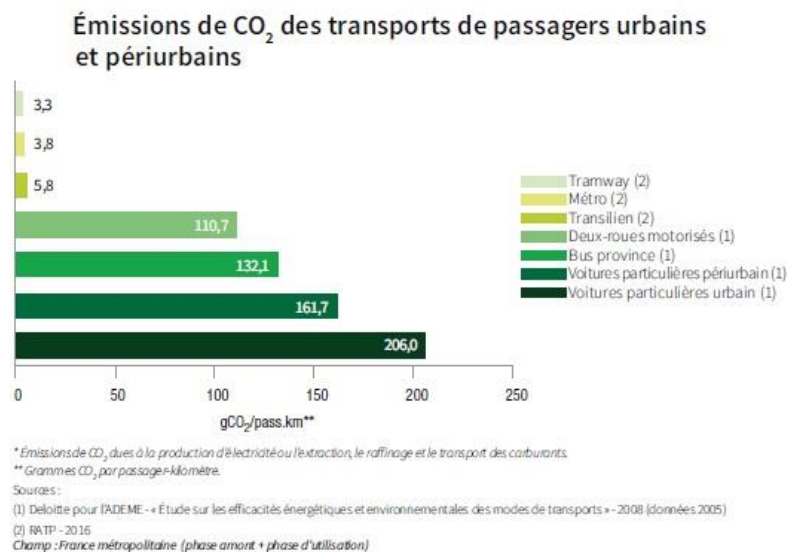
Le transport collectif, s'il ne représente encore que 20% de l'ensemble des déplacements, tend à s'accroître plus rapidement que le transport individuel. Le transport ferré a notamment observé une hausse constante de son utilisation jusqu'en 2011, avant de se stabiliser. En Île-de-France, la fréquentation des RER est restée stable durant les vingt dernières années, tandis que la circulation des métros et des tramways a été respectivement multipliée par 1,7 et 4,5. La majorité des déplacements en transport collectif s'effectuent dans cette région, alors même qu'elle ne compte que pour 19% de la population française. Ainsi, les enjeux du transport sur rail sont particulièrement présents au sein de la capitale et de sa banlieue. (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017)

En outre, on observe un développement de l'intermodalité, qui désigne en géographie des transports et des mobilités « l'aptitude d'un système de transport à permettre l'utilisation successive d'au moins deux modes, intégrés dans une chaîne de déplacement » (Ageron, 2014). C'est notamment l'objet de la loi du 12 juillet 2010 portant Engagement National pour l'Environnement (ENE), dite « Grenelle II », qui vise à améliorer

l'intermodalité, notamment en développant de nouveaux services à la mobilité (autopartage, covoiturage, plans de mobilité) et en mettant en avant les modes doux (Ademe, 2018a).

### 1.1.2 Les déplacements sur réseau ferré : un impact moindre sur l'environnement ?

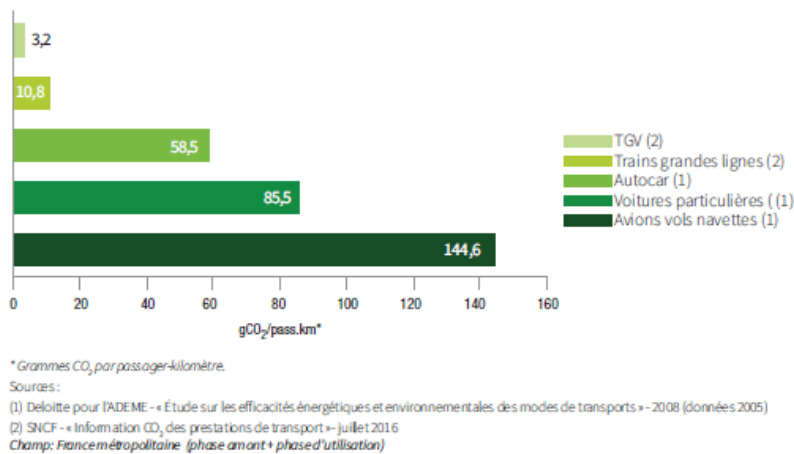
L'avantage considérable des moyens de transport sur rail le plus souvent avancé est l'impact environnemental réduit des déplacements. En effet, une étude de l'Ademe publiée en 2017 sur les émissions de dioxyde de carbone de la production d'électricité ou l'extraction, le raffinage et le transport des carburants a démontré que les transports urbains ferrés ne rejettent dans l'atmosphère que 4,3 grammes par passager et par kilomètre en moyenne, contre 206 grammes pour les voitures circulant en ville. Ainsi, délaissier la voiture au profit du tramway, du métro ou du RER permet de diviser près de cinquante fois l'impact atmosphérique de nos trajets urbains. (Ademe, 2018a)



**Figure 1.1 Émissions de CO<sub>2</sub> des transports de passagers urbains et périurbains** (Ademe, 2018a)

En ce qui concerne les déplacements sur des distances nationales, l'étude confirme également que les trajets en train émettent nettement moins de gaz à effet de serre que les transports sur route ou l'avion. En considérant l'efficacité énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> des différents moyens de transport, en tenant compte des émissions liées tant à la production qu'à l'utilisation de l'électricité et des ressources fossiles, il ne fait nul doute que la contribution des transports sur rail au total des émissions de GES du secteur des transports est marginale. En effet, cela s'explique notamment par l'électrification du réseau ferré, qui représentait plus de 55% des lignes ferroviaires en 2015 et dont la proportion ne cesse de s'accroître depuis le début du siècle (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017), remplaçant progressivement les moteurs thermiques et à vapeur, bien plus polluants. Grâce au développement des Lignes à Grandes Vitesses, la SNCF espère observer un report modal de l'avion sur le train, qui permettrait de réduire de plus de 97% les émissions de nos déplacements.

### Émissions de CO<sub>2</sub> des transports de passagers sur des distances nationales



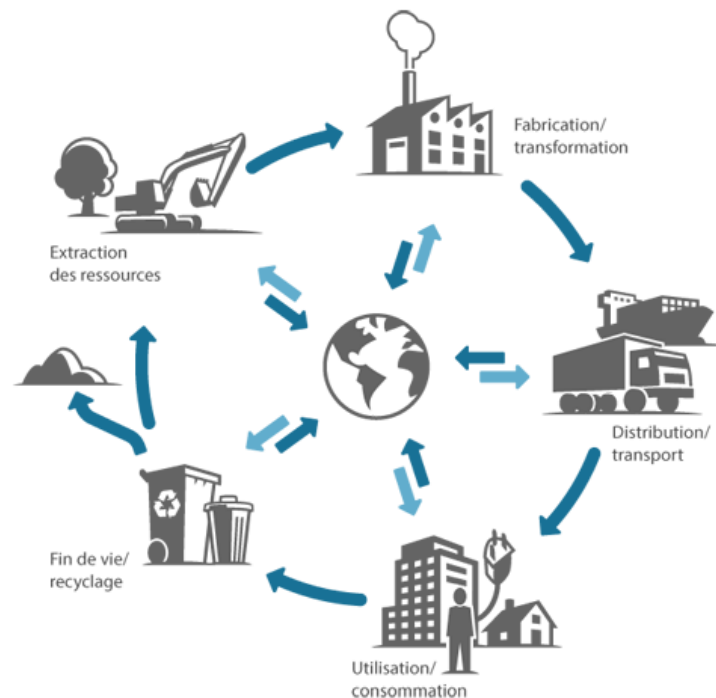
**Figure 1.2 Émissions de CO<sub>2</sub> des transports de passagers sur des distances nationales**  
(Ademe, 2018a)

Pourtant, l'étude publiée par l'Ademe comporte plusieurs limites à considérer pour éviter d'en tirer des conclusions biaisées. D'une part, les études mentionnées en source du graphique ne prennent en compte que les émissions de dioxyde de carbone, conformément au guide méthodologique d'information des émissions de carbone des prestations de transport réalisé par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie en 2012, sur lequel elles s'appuient. En effet, ce choix est justifié dans le guide par le fait que le CO<sub>2</sub> est le principal gaz à effet de serre émis par le secteur du transport « lors de la phase de production pour l'électricité et lors des phases de production et de fonctionnement pour les carburants ». Bien que cette information soit exacte, d'autres GES sont également produits par le secteur du transport et leur contribution est inégale en fonction du moyen de transport. Le méthane (CH<sub>4</sub>) notamment, provient des exploitations pétrolières et gazières, et présente un pouvoir de réchauffement global (PRG) vingt-cinq fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (Jancovici, 2007). Ainsi, comparer différents moyens de transports (air, route et fer) en se basant uniquement sur les émissions de CO<sub>2</sub> ne permet qu'une analyse partielle du poids des déplacements sur le réchauffement climatique. De plus, l'électricité produite en France est principalement d'origine nucléaire. Si la production et l'utilisation d'énergie nucléaire sont peu émissives en GES, elle n'est pas sans comporter des risques environnementaux et sanitaires majeurs et demeure problématique quant à la gestion de ses déchets radioactifs. D'autre part, en ne considérant que les émissions liées à la production d'électricité ou d'extraction nécessaires au fonctionnement des véhicules, l'Ademe n'intègre pas l'impact carbone de la construction et de l'utilisation des infrastructures de transport (voies ferrées, gares...), pourtant indispensables à leur fonctionnement. Ainsi, le seul facteur des émissions de GES ne permet pas de conclure que les transports sur rail exercent une pression moindre sur l'environnement par rapport à ceux sur route ou dans les airs. À l'inverse, l'ACV permet de modéliser l'ensemble des impacts générés au cours du cycle de vie du produit étudié et de ses co-produits (Dandres, 2012).

### 1.1.3 L'Analyse du Cycle de Vie des différents moyens de transport

Pour comparer les rejets et la pollution des différents moyens de transport tels que la voiture, le train et l'avion, il est d'usage de ne considérer que la phase d'utilisation et le fonctionnement du véhicule en lui-même (Deloitte, 2008). Cependant, cette approche présente le défaut majeur d'oublier que tout moyen de transport nécessite des infrastructures (routes, réseaux ferrés, gares routières et ferroviaires, aéroports ...) dont ils ne peuvent s'affranchir et qui doivent être construits et entretenus. (ConsoGlobe, 2012)

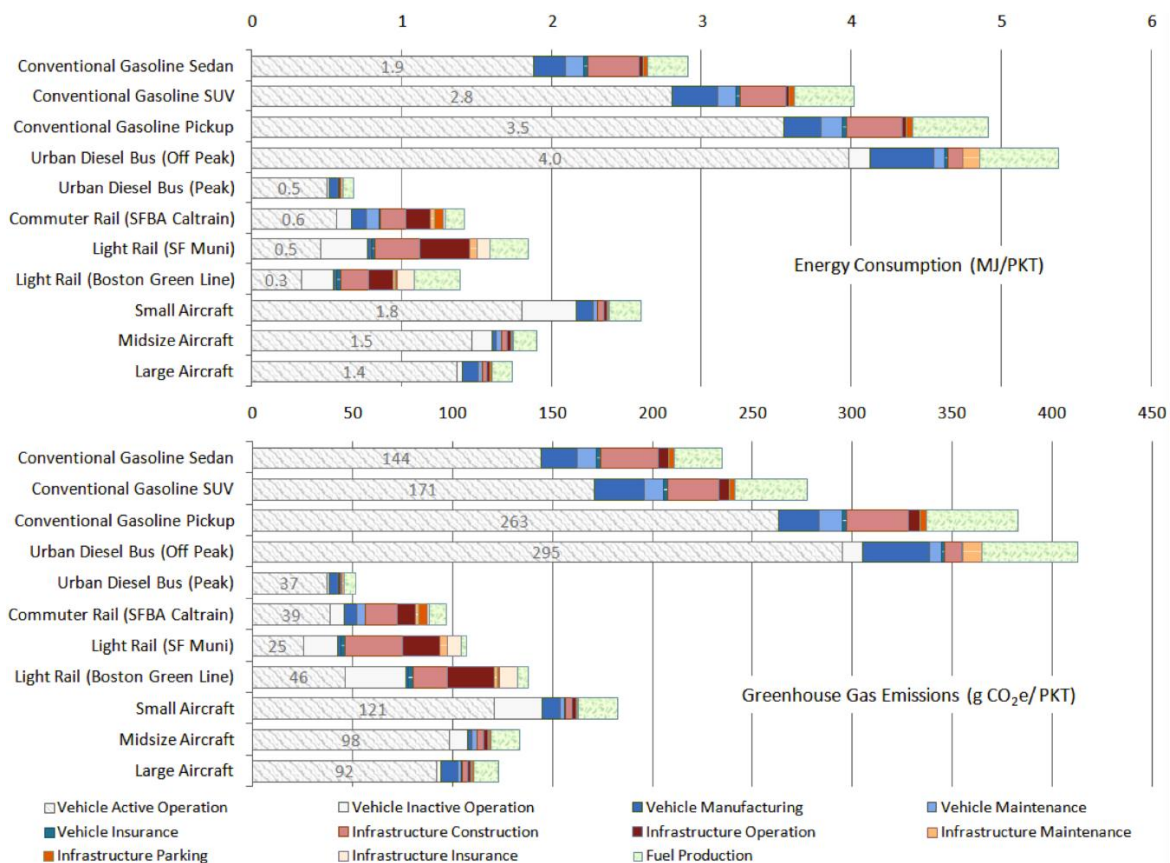
Pour analyser l'ensemble des impacts environnementaux d'une solution et la comparer avec ses alternatives, la méthodologie la plus pertinente actuellement est celle de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). D'après l'Ademe, il s'agit de « l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux ». (Ademe, 2018c) Elle se définit comme « une évaluation des effets directs ou indirects d'un produit [ou d'un service] sur l'environnement, depuis l'extraction des matières premières qui entrent dans sa composition jusqu'à son élimination » (Dictionnaire de l'environnement, 2003). Pour ce faire, l'ACV consiste à réaliser un Inventaire de Cycle de Vie qui compile l'ensemble des intrants et des extrants sur l'ensemble du cycle de vie, puis à en évaluer les effets sur les catégories d'impacts sélectionnés (écotoxicité, effet de serre, eutrophisation, énergie non renouvelable, ...). Il s'agit donc d'une analyse systémique visant à considérer de manière exhaustive l'ensemble des impacts environnementaux potentiels d'une unité fonctionnelle, c'est-à-dire d'une unité clairement définie et mesurable (Université Virtuelle Environnement & Développement Durable [UVED], s. d.b) au cours des différentes phases de son cycle de vie, telles que présentées dans la figure 1.3.



**Figure 1.3 Étapes considérées dans une ACV** (Hydro Québec, s. d.)

Deux principales approches dans la définition du périmètre d'étude font varier l'analyse : l'ACV attributionnelle (ACV-A) et conséquentielle (ACV-C). La différence entre les deux approches est que l'ACV-A considère les impacts environnementaux du produit sur l'ensemble du cycle de vie, quand l'ACV-C permet d'aller plus loin en intégrant également les « processus externes au système de processus du cycle de vie du produit étudié » (Dandres, 2012). Cette méthode permet ainsi d'évaluer les impacts d'un moyen de transport en intégrant également l'analyse du cycle de vie des infrastructures dont il dépend, comme les infrastructures et les bâtiments.

Deux chercheurs américains, Mikhail V. Chester et Arpad Horvath, de la prestigieuse université Berkeley, ont publié en 2009 dans la revue *Environmental research letters* une étude sur l'Analyse du Cycle de Vie des passagers selon leur mode de transport. L'originalité de leur approche repose sur l'intégration des infrastructures dans le périmètre de leur analyse. Comme le titre de l'étude le suggère, « *Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains* », les deux scientifiques considèrent que pour être pertinente, l'évaluation des impacts environnementaux des différents moyens de transport devrait prendre en compte les infrastructures nécessaires à leur fonctionnement sur l'ensemble de leur cycle de vie et sur toute la chaîne d'approvisionnement. (Chester et Horvath, 2009)



**Figure 1.4 Consommation d'énergie et émissions de GES des transports (Chester et Horvath, 2009)**

L'étude de Chester et Horvath portait sur les ACV comparatives de onze moyens de transport différents aux États Unis. En intégrant de nouveaux paramètres dans leur analyse (infrastructures, durée de vie, entretien), en plus des dépenses d'énergie en fonctionnement, ils constatent une augmentation conséquente des impacts environnementaux et de la consommation énergétique, néanmoins variable en fonction du mode de déplacement. En effet, l'impact des transports sur route (voiture, camions et bus) se voyait alourdi de 63% par les infrastructures routières, contre 31% supplémentaires pour les trajets en avion. Le train, quant à lui, subissait une hausse de 155% lorsque les voies ferrées et les bâtiments étaient considérés. L'étude parvient à la conclusion qu'à taux de remplissage maximal, un gros avion serait moins émetteur en GES que la ligne verte du métro de Boston ou un pick-up au diesel. (Chester et Horvath, 2009)

L'objectif ici n'est pas de démontrer qu'un mode de transport doit prévaloir sur un autre. En effet, s'il est d'usage de confronter les empreintes carbone par passager et par kilomètre (comme présenté en 1.1.2), il n'est pas toujours pertinent de comparer un train de banlieue à un avion grande ligne, et ce, principalement parce que les distances parcourues pour un trajet moyen ne sont pas du même ordre de grandeur et que ces différents modes de transport ne répondent pas au même besoin. De plus, les performances d'un moyen de transport varient proportionnellement à son taux de remplissage. Ainsi, les lignes ferroviaires et urbaines les plus fréquentées affichent des émissions faibles par passager, quand à l'inverse, certaines stations desservies en bout de ligne accusent un plus mauvais bilan que les transports sur route (Chester et Horvath, 2009).

La publication des deux chercheurs américains a cependant mis en exergue la contribution relativement importante des infrastructures dans l'empreinte globale des déplacements en train, et l'importance de considérer l'ensemble des paramètres du cycle de vie dans l'évaluation environnementale d'un moyen de transport. Du point de vue de l'éco-conception, ce constat démontre l'intérêt de s'intéresser à l'intégration des enjeux environnementaux dans la conception et l'exploitation des équipements ferroviaires et bâtiments annexes.

#### **1.1.4 Le Bilan Carbone® de la Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône**

Commanditée par le Réseau Ferré de France (SNCF Réseau de nos jours), la première branche de la Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône a été assortie d'un Bilan Carbone® ferroviaire inédit. Pour la première fois, le périmètre de l'étude des émissions de gaz à effet de serre s'est étendu sur l'ensemble du cycle de vie : conception, réalisation, exploitation et maintenance de la ligne et des gares, circulations, construction et entretien des rames, jusqu'à trente à cent ans (amortissement de l'infrastructure) après la mise en service de la ligne. Grâce à une collecte à la source, sur le chantier et directement auprès des entreprises et fabricants de matériaux, l'étude s'est basée principalement sur des données réelles. Cet inventaire exhaustif des intrants et extrants et l'élaboration par l'Ademe de facteurs d'émissions personnalisés visaient à déterminer les postes les plus impactant d'un projet de conception de Ligne à Grande Vitesse. (Réseau Ferré de France, s. d.a)

L'état des lieux des émissions de la LGV Rhin-Rhône permet de constater que les postes d'émissions les plus importants sont, à parts presque égales, l'utilisation de matériaux lors de la construction des infrastructures (bâtiments, équipements, etc.) et l'énergie de traction des trains (en exploitation), puisqu'ils contribuent pour 65% du total des émissions. Les résultats de l'évaluation carbone montrent également que la quantité de GES émise lors des études et travaux de génie civil est supérieure à celle de l'exploitation et la maintenance de la ligne pendant 30 ans. Enfin, les seules émissions liées à l'énergie de traction des trains pendant trente ans représentent un tiers des émissions globales. Bien que ce poste soit loin d'être négligeable, il ne devrait pas être le seul critère de comparaison de l'empreinte carbone des différentes alternatives de déplacement.

**Tableau 1.2 : Synthèse des émissions de la LGV Rhin-Rhône** (d'après les données de l'Ademe, 2009)

			teCO2	teCO2		
Etudes et Travaux de Génie Civil	Phase Conception	Etudes	22000			
		Travaux préparatoires	110000			
	Travaux de Génie Civil	750000	Energie interne des bâtiments dédiés à la LGV	100		
			Extraction et mise en œuvre des matériaux	41000		
			Transport de matériaux par camion	107000		
			Transport de personnes	47000		
			Matériaux entrants	550000		
			Amortissements	2050		
			Travaux annexes	9000		
			882000			
Travaux d'équipements et bâtiments ferroviaires	Phase Réalisation	Raccordements au réseau ferroviaire existant	55000			
		Equipements ferroviaires	117000	Signalisation, Energie, Arêtes câblées	5000	
				Voies, Caténaires, Base travaux	106000	
				Batiments techniques	730	
				Télécommunications	730	
				Alimentation traction	1000	
				Equipements signalisation et détecteur de boîte chaude	2000	
		Construction des trames TGV	95000			
		Gares et autres bâtiments ferroviaires	29000	Construction de deux gares TGV	20000	
				Aménagement des technicentres	2000	
				Construction d'un poste de commande	630	
				Construcution des bases maintenance	4000	
		296000				
Opérations d'exploitation et de maintenance durant 30 ans	Phase d'exploitation et de maintenance	Fonctionnement des gares nouvelles	5000			
		Maintenance des trames TGV	24000			
		Maintenance de l'infrastructure	19000			
		Energie de traction	635000			
				684000		
Total			1062000			

Le Bilan Carbone® de la LGV Rhin-Rhône démontre l'intérêt d'évaluer les impacts environnementaux des projets du secteur ferroviaire sur l'ensemble du cycle de vie, dès la conception. En effet, en ne considérant que la phase de fonctionnement, les études comparatives des différents moyens de transport (par passager et par kilomètre) occultent des sources d'émissions non négligeables. Leur intégration dans l'évaluation de l'impact carbone permet notamment de déterminer les points chauds (c'est-à-dire les postes dont la contribution carbone est la plus importante sur la globalité du projet) et d'en déduire des pistes d'amélioration à travers un plan d'action et des solutions d'éco-conception.

De plus, les résultats de cette étude ont confirmé, selon l'Ademe, l'efficacité des déplacements en train pour lutter contre le réchauffement climatique : pour 1 862 600 teCO<sub>2</sub> émises sur l'ensemble du cycle de vie du projet, l'Ademe estime qu'en contrepartie 3 895 000 teCO<sub>2</sub> seront économisées durant 30 ans grâce au report modal des déplacements sur route ou aériens (Ademe 2009). Ainsi, la Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône deviendra « carbone positive » à partir de 15 ans d'exploitation.

### **1.1.5 Les impacts environnementaux des transports sur rail**

Si, pour être complète, l'étude des impacts environnementaux des transports doit intégrer l'ensemble des étapes du cycle de vie et considérer les infrastructures dont ils sont interdépendants, elle doit également s'intéresser à différentes catégories d'impact, et non se réduire aux seules émissions de gaz à effet de serre. En effet, quand la mesure des émissions des gaz à effet de serre (grâce à la méthode Bilan Carbone® par exemple) permet d'évaluer les incidences d'un produit, d'un service ou d'une activité sur le réchauffement climatique, l'ACV quant à elle « est en mesure d'étudier les potentiels déplacements d'impact vers d'autres catégories » (Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P. et Shaked, S., 2010). C'est la raison pour laquelle la méthode ACV est reconnue comme « l'outil le plus fiable pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service » (CNRS, 2015)

La multiplication des lignes ferroviaires et des équipements qui les accompagnent (gares, haltes ferroviaires, sites de maintenance et de remisage, etc.) requiert de consommer et morceler de plus en plus d'espaces urbains et ruraux. On considère en effet que l'implantation d'une LGV nécessite en moyenne dix hectares par kilomètres (Réseau Ferré de France, 2004). En conséquence, on peut noter des effets néfastes sur les milieux naturels (perturbation de la faune et de la flore, effets de coupure ou encore problèmes de franchissement), une réduction des surfaces agricoles disponibles et une baisse de la qualité de vie (allongement du parcours des piétons et vélo, insécurité). De plus, l'implantation d'infrastructures de transport peut nuire à un territoire en réduisant son intérêt touristique et sa diversité biologique (Ademe, 2016). En outre, la construction de réseaux ferrés génère des impacts sur la biodiversité, similaires à ceux des autoroutes (Vandeveld, 2013).

Les effets de coupure, provoqués par la construction de voies ferrées, nuisent également à la protection de la ressource en eau, car les réseaux ferroviaires perturbent l'écoulement naturel des eaux. De plus, les



travaux de franchissement des cours d'eau peuvent avoir des conséquences sur la reproduction des espèces aquatiques. Enfin, l'implantation des infrastructures de transport empêche dans certains cas l'accès aux nappes phréatiques, nécessaires pour les usages agricoles et l'alimentation en eau potable, et peut conduire à terme à l'assèchement de la ressource en eau. (Réseau Ferré de France, 2004)

L'empreinte écologique des transports est intimement liée à la source d'énergie qui est exploitée. En France, une grande partie de l'électricité utilisée pour le fonctionnement des trains, des tramways et des métros provient de centrales nucléaires. Ainsi, la pollution atmosphérique et les émissions de GES sont minimales, même en considérant les infrastructures et équipements connexes. C'est la raison pour laquelle les moyens de transport sur rail électrifiés sont souvent présentés comme des modes « propres ». Pourtant, l'énergie nucléaire n'est pas sans présenter de nombreux impacts sur l'environnement. D'une part, les centrales nucléaires dégagent une quantité importante de chaleur (2 MW de chaleur par Mégawatt d'électricité produit), en raison de leur rendement énergétique de 34%, qui est ensuite évacuée dans les eaux de surface à proximité (rivières ou mer). L'augmentation de la température des milieux aquatiques peut alors avoir des conséquences néfastes sur l'équilibre de la biodiversité environnante. D'autre part, les centrales nucléaires présentent des risques environnementaux et sanitaires majeurs en cas de rejet accidentel de polluants radioactifs, qui contamineraient alors les eaux (nappes phréatiques, fleuves et océans) et l'air. De plus, l'exposition aux radiations ionisantes présente des effets sur la santé humaine, dont la sévérité dépend de la dose et du débit. Les rayonnements peuvent en effet endommager les tissus cellulaires et altérer le fonctionnement des organes, voire même être à l'origine de cancers (Organisation Mondiale de la Santé, 2016). Enfin, la problématique la plus généralement avancée est celle du traitement des déchets nucléaires : environ 200 tonnes sont produites par an en France. Leur gestion est préoccupante, puisqu'ils contiennent 99% de la radioactivité du combustible et restent très dangereux pendant au moins un millénaire. Le projet Cigéo, auquel participe Systra, vise à enfouir les déchets radioactifs à 500 mètres sous terre pendant un million d'années. (Natura Sciences, 2018b) Si le nucléaire présente l'avantage de limiter, comparativement aux énergies fossiles, la contribution de l'énergie sur le phénomène de réchauffement climatique, il ne peut pour autant être considéré comme propre ou écologique, et ses effets sur l'environnement doivent être considérés dans le bilan global des impacts des transports électrifiés.

Les nuisances sonores représentent également un impact environnemental majeur des transports linéaires sur rail, bien que moins importantes que celles du trafic routier. Les principales sources d'émissions sont les bruits de roulement, liés au contact des roues avec le rail, le bruit de crissement au freinage et le bruit des moteurs diesel, quand le train n'est pas électrifié. (Ademe, 2016) Il est cependant à noter que les nuisances sonores ne sont pas, à ce jour, officiellement considérées dans les indicateurs de l'Analyse de Cycle de Vie, mais font l'objet de nombreux travaux de recherche. Le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) a notamment mené une étude sur l'« intégration du bruit de trafic routier dans l'analyse du cycle de vie » (Meyer, Lavandier, Gauvreau et Vincent, 2016).

## 1.2 Entreprendre une démarche d'éco-conception

Il n'existe pas de démarche d'éco-conception type ou réglementaire, bien que la nouvelle version de la norme ISO14001 impose aux concepteurs d'avoir une démarche orientée « cycle de vie ». En effet, il revient à chaque entreprise de la définir en fonction de son secteur d'activité, de son organisation, de ses enjeux et de ses besoins. (Organisation internationale de normalisation [ISO], (2015). De plus, chaque démarche est unique puisqu'elle doit s'adapter aux spécificités du projet pour lequel elle cherche à intégrer l'environnement dans le processus de conception. Dans tous les cas, elle est volontaire et traduit la volonté des parties prenantes d'intégrer des problématiques nouvelles dans la gestion de projet et d'aller au-delà des contraintes réglementaires. Une démarche d'éco-conception est également un vecteur d'innovation pour l'entreprise. (Pôle éco-conception et Institut de développement de produits, 2014)

Dans les projets de conception d'infrastructures de transport urbain et ferroviaire, le maître d'ouvrage, qui est commanditaire et financeur du projet, définit ses besoins et fournit un cadre au maître d'œuvre. Celui-ci est chargé de la conception et de la réalisation du projet pour le compte de son client. Il est également responsable de l'animation de la démarche d'éco-conception. Ces deux acteurs doivent s'assurer que l'ensemble des parties prenantes, préalablement identifiées, souhaitent et puissent s'impliquer au cours des différentes phases du projet. C'est également à eux que revient la tâche de définir les cibles et les objectifs visés par l'éco-conception, les informations à diffuser (en interne, aux différents acteurs et au grand public) et les modes de communication à utiliser. (Systra, Guide tramways durables - volet Management de projet, 2016)

Le maître d'ouvrage est celui qui définit les objectifs de développement à atteindre. Par exemple, dans le cas d'un projet de conception d'une gare ferroviaire, il pourra fixer pour cible l'obtention d'une certification de niveau Haute Qualité Environnementale (HQE), délivrée par l'organisme Certivéa pour les bâtiments tertiaires et les Établissements Recevant du Public (ERP). Celle-ci atteste que les enjeux de développement durable ont été intégrés sur l'ensemble des étapes du cycle de vie du bâti (conception, construction, fonctionnement et déconstruction). C'est également au maître d'ouvrage de nommer un pilote de projet au sein de son équipe, qui devra assurer la gestion des différentes interfaces avec les autres parties prenantes au projet, mais également donner l'impulsion et gérer la démarche. (Systra, Guide tramways durables - volet Management de projet, 2016)

Le maître d'œuvre, quant à lui, intègre les objectifs de développement durable (fixés par le maître d'ouvrage) à la conception et veille à les atteindre sur toutes les étapes du projet (études préliminaires, avant-projet, conception et exécution). Pour cela, il peut être accompagné d'un Assistant Maîtrise d'Œuvre (AMOE). En son sein, il nomme un chargé d'étude pour la mise en œuvre de la démarche d'éco-conception et de sa communication auprès des membres de l'équipe, et un chargé d'études développement durable. Celui-ci aura pour mission de mener la démarche en s'assurant qu'elle réponde à l'ensemble des engagements définis par le maître d'ouvrage (Systra, Guide tramways durables - volet Management de projet, 2016).

### **1.2.1 L'intégration de l'environnement en phase conception**

Pour optimiser les performances environnementales des infrastructures de transport, il est primordial d'intégrer les considérations de développement durable dès le début du processus de conception par les bureaux d'études. En effet, il est généralement considéré que 70 à 80% des impacts environnementaux et sociétaux d'un produit seront déterminés lors de la conception : c'est donc à ce stade que les mesures de réduction seront les plus pertinentes (Pôle Éco-conception, s. d.).

Dans un premier temps, les enjeux environnementaux, sociaux et économiques du projet doivent être clairement identifiés : gestion des ressources, changements climatiques, santé et sécurité, cadre de vie, biodiversité, développement économique, coût global, transparence des affaires, etc. Pour y répondre, des actions et mesures concrètes doivent être définies. Pour cela, le Carnet de Bord du Développement Durable (CBDD) est un outil en ligne développé par l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France (AITF) et Syntec-Ingénierie permettant un suivi des exigences de développement durable au cours de toute la durée de vie du bâtiment et des infrastructures. (Systra, Guide tramways durables - volet Management de projet, 2016) Cet outil est particulièrement utile lorsque le maître d'ouvrage ne fournit pas de cadre, mais il est en pratique de moins en moins utilisé. Le chef de projet s'assure que chacun des acteurs de la conception intègre les objectifs de développement durable définis dans le cahier des charges par le maître d'ouvrage. Des solutions techniques permettant d'atteindre ces objectifs doivent être proposées (approvisionnement durable, dispositifs de performance énergétique, propositions d'alternatives aux matériaux et procédés traditionnels, intégration urbaine, réutilisation et recyclage des déchets, etc.). Le responsable développement durable (ou le chargé d'éco-conception) devra alors faire valoir son expertise et apporter son soutien dans la recherche de solutions. Ce chargé d'études travaille en étroite collaboration avec tous les corps de métier pour proposer et étudier la faisabilité économique et technique de chaque solution. (M. Baumann, conversation, 23 mars 2018)

### **1.2.2 L'intégration de l'environnement en phase travaux**

S'il est indispensable de considérer l'environnement dans la conception des infrastructures pour en réduire la pression écologique, l'impact de la phase travaux ne doit pas pour autant être négligé. En effet, elle peut s'étendre sur plusieurs mois voire plusieurs années pour les projets les plus ambitieux, telles que les Lignes à Grande Vitesse qui parcourent la France, et produit d'autant plus d'effets sur l'environnement (pollutions, perturbation des milieux naturels, ...) et la société (nuisances sonores, visuelles, ...). Pour s'assurer de limiter les impacts de la construction pendant la phase de travaux, une charte « chantier vert », élaborée par l'Ademe à l'intention des professionnels du BTP (Bâtiments et Travaux Publics), permet d'intégrer des mesures de développement durable, telles que la gestion des déchets de chantier, la limitation des nuisances sonores, la protection de la qualité des eaux et des milieux naturels, etc. Pour aller plus loin, une clause sociale permet de favoriser l'emploi de travailleurs locaux et l'accès à l'emploi des personnes en situation de handicap ou précaire. (Systra, Guide tramways durables - volet Management de projet, 2016)

### 1.2.3 L'intégration de l'environnement en phase exploitation

En phase d'exploitation des infrastructures de transport, l'énergie est l'un des postes les plus impactants en termes de développement durable. La maintenance des équipements contribue également fortement à alourdir le bilan environnemental, c'est pourquoi elle doit être pensée et optimisée dès la conception. On peut opter, par exemple, pour l'utilisation d'un enrobé en grave-bitume dans la construction des voies pour limiter l'entretien et l'usage de phytosanitaire en phase d'exploitation, ou encore l'installation de dispositifs intelligents dans les ouvrages d'art, tels que les Systèmes de Détection d'Incidents (SDI) pour limiter les déplacements de maintenance et l'intervention d'engins lourds (M. Baumann, conversation, 23 mars 2018).

Pour s'assurer du suivi de la politique de développement durable au cours de l'exploitation et de la sensibilisation et formation du personnel aux bonnes pratiques, un responsable développement durable peut-être désigné par le gestionnaire du bâti ou de l'infrastructure. Cependant, les recommandations du concepteur ne sont pas toujours respectées par les exploitants, notamment lorsque celui-ci n'a pas été concerté lors de la conception. Une fois le projet livré, le maître d'œuvre se libère de sa charge et de ses obligations en matière de développement durable (M. Baumann, conversation, 23 mars 2018).

## 1.3 Exemples de projets d'éco-conception d'infrastructures linéaires de transport sur rail

### 1.3.1 Eco-gares

Inaugurée en 2012, la première halte « éco-durable » d'Île-de-France est située à Gravigny-Balizy, sur la commune de Longjumeau dans l'Essonne, et dessert la ligne C du RER. En charge de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre, la SNCF a souhaité faire valoir son exemplarité en matière de conception durable en respectant les principes de la certification Haute Qualité Environnementale (HQE). (Arep, 2012)



**Figure 1.5 Halte « écodurable » à Gravigny-Balizy (Arep, 2012)**

Inspirée des critères définis dans le référentiel HQE, cette halte « éco-durable » a été conçue pour limiter sa pression écologique, tant lors de sa construction que pour son fonctionnement. Principalement composé de bois (matériau durable, recyclable et renouvelable), le bâtiment exerce une faible empreinte au sol et est orienté sud, pour profiter de l'ensoleillement naturel et éviter l'exposition des usagers au vent et aux intempéries. La préfabrication des pièces en atelier avant assemblage sur site a permis d'obtenir un chantier propre à faible empreinte environnementale. Enfin, l'infrastructure bénéficie de 40 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques, d'une toiture végétalisée qui assure la filtration des eaux pluviales et contribue au développement de la biodiversité, et d'un système de récupération de l'eau de pluie pour l'arrosage des espaces verts. (SNCF, 2012)

Loin d'être anodin, le projet d'éco-gare de Gragny-Balizy a été pensé comme le prototype d'un nouveau concept de gare, qui intègre des exigences de développement durable ambitieuses et cherche à réduire autant que possible ses impacts sur l'environnement. Cette « opération pilote » s'inscrit directement dans la politique d'intégration des aspects environnementaux dans les actions et projets de la SNCF et permet d'expérimenter des solutions d'éco-conception sur une gare de faible affluence (environ 900 personnes par jour), avant de les reproduire à plus grande échelle si le retour d'expérience est positif. (SNCF, 2012)

### 1.3.2 Site de Maintenance et de Remisage

Récompensé en 2013 par le premier prix des trophées RATP des projets éco-conçus, le Site de Maintenance et de Remisage (SMR) de Ladoumègue (dans le 19<sup>ème</sup> arrondissement de Paris) s'est illustré pour son intégration des considérations environnementales dans la conception de l'infrastructure, et ce sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce trophée, décerné par un jury composé de la RATP, de l'Ademe, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et du journal en ligne Actu Environnement, récompensait la meilleure démarche d'éco-conception selon cinq critères : la maîtrise des coûts, le nombre de thématiques environnementales traitées, le nombre et l'amplitude de solutions innovantes, la vérification de l'atteinte des performances environnementales en phase d'utilisation et la reproductibilité des solutions mises en œuvre. (Actu Environnement, 2013)



Figure 1.6 Avant/après du projet d'intégration urbaine du SMR de Ladoumègue (RATP, 2012)

Dédié au garage et à la maintenance des rames de la ligne de tramway T3b, le SMR de Ladoumègue s'est inscrit dans un projet d'aménagement et de réhabilitation réalisé en concertation avec la ville de Paris. Afin d'optimiser l'espace urbain, déjà saturé, des infrastructures sportives (gymnase, salle d'escalade, court de tennis) ont été superposées sur les 35 000m<sup>2</sup> du site couvert. Il en résulte une parfaite intégration du SMR dans le paysage urbain parisien. (Actu Environnement, 2013)

De nombreuses solutions d'éco-conception ont été mises en œuvre sur le SMR du T3b. On compte parmi elles le recours à l'énergie solaire grâce à 900m<sup>2</sup> de revêtement photovoltaïque, l'utilisation d'une pompe à chaleur sur neuf sondes géothermiques pour le chauffage des locaux du personnel et de l'atelier, ainsi qu'un suivi performant des consommations (énergie et eau) par un dispositif de Gestion Technique du Bâtiment (GTB). Le bâtiment, en zinc, bénéficie d'une isolation extérieure renforcée, d'une toiture végétalisée et de vitrages de haute qualité thermique orientés au nord. Enfin, 80% des eaux de lavage des rames de tramway sont recyclés et réutilisés sur le site (le SMR disposant de sa propre centrale de traitement). En sus, la conception anti-vibratile de l'infrastructure permet de réduire considérablement les nuisances sonores. (Actu Environnement, 2013 et RATP, 2012)

### **1.3.3 Ligne à Grande Vitesse**

La France dispose aujourd'hui d'un réseau performant de Lignes à Grande Vitesse qui traversent le pays. La LGV Rhin-Rhône est la première à avoir été accompagnée d'une démarche ambitieuse d'intégration des aspects environnementaux dès les études préliminaires en 1993. En plus de la réalisation d'un Bilan Carbone® global sur trente ans et de l'application de la séquence « éviter, réduire et compenser », le projet a été assorti d'actions concrètes visant à limiter les impacts environnementaux de la nouvelle ligne.

Afin d'assurer une gouvernance partagée et de limiter les impacts du tracé de la ligne sur les activités agricoles et sur l'environnement naturel et humain, le Réseau Ferré de France, initiateur du chantier, a entrepris une concertation avec l'ensemble des parties prenantes (élus locaux, populations, organisations agricoles et forestières) dès la conception de la LGV et sur l'ensemble des phases du projet. (LGV Rhin-Rhône, s. d.) Les particularités géographiques, géologiques et environnementales des 85 communes (principalement situées en zones rurales) traversées par la ligne ont été analysées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) et l'intégration des ouvrages d'art au contexte territorial et paysager a été particulièrement étudiée. Pour préserver la ressource en eau, la LGV a été tracée de manière à s'éloigner au maximum des zones de captage de l'eau potable. (Réseau Ferré de France, s. d.b)

L'attention a également été portée sur la préservation des milieux naturels. Pour cela, l'ensemble des cours d'eau a été cartographié et a fait l'objet d'une vigilance accrue au cours des travaux. De plus, la compensation de 125 hectares de zones humides a permis de reconstituer « à surface et à qualité équivalente » les milieux impactés par l'implantation de la LGV. En phase travaux, 88 passages à faune ont été établis pour assurer les axes de déplacement des mammifères et limiter les perturbations sur

les espèces animales. Les 27 mares de substitutions étalées sur 140 kilomètres ont également permis de recréer le milieu aquatique des amphibiens. Enfin, 33 kilomètres de merlon paysager ont été accolés aux chantiers pour assurer une protection paysagère et acoustique. (Réseau Ferré de France, s. d.b)

Plusieurs dispositions ont été prises pour limiter l'impact de l'approvisionnement lors de la construction de la ligne et de ses infrastructures. Par exemple, la volonté de tendre vers un équilibre entre les volumes de terre de déblai et les volumes de terre de remblai a été intégrée dans les exigences de conception. De cette manière, le transport des matériaux importés et exportés a été optimisé. Une microstation d'épuration a également été installée lors des travaux du tunnel de Chavanne, afin de traiter les eaux usées directement sur site. En ce qui concerne plus spécifiquement la pose des équipements ferroviaires, le suivi des déchets et les mesures de pollution ont fait l'objet d'un contrôle rigoureux. (Réseau Ferré de France, s. d.b)

En outre, le RFF considère la LGV Rhin-Rhône comme un projet de référence de développement durable, dont la démarche et les actions seront reproduites sur les prochains chantiers ferroviaires.

#### **1.4 Synthèse**

Le développement de la mobilité, notamment depuis la démocratisation de l'automobile, a fait émerger de nouveaux modes de vies et a notamment largement contribué à l'étalement urbain et à l'accessibilité aux loisirs et aux vacances (Boillat et Pini, 2005). Dans un contexte national où le transport sur route est de plus en plus contraint par la congestion des grands axes et l'augmentation du prix du pétrole, le transport sur rail tend à s'imposer comme un mode de transport d'avenir (Spinetta, 2018), tant pour les déplacements quotidiens grâce aux tramways, métros, RER et TER, que pour les déplacements longues distances comme alternative à l'avion, à travers le développement des LGV et de l'Hyperloop (Crozet, 2018).

Présentés comme des modes de déplacement « propres » à favoriser pour réduire la contribution de la mobilité aux phénomènes de changements climatiques, les transports sur rail voient cependant leurs impacts souvent largement minimisés. En effet, pour déterminer l'impact environnemental des différents modes de déplacement, il est d'usage de considérer uniquement les émissions de GES des véhicules en phase d'exploitation, occultant ainsi les autres catégories d'impacts environnementaux et la contribution des coproduits et équipements annexes pourtant indispensables au bon fonctionnement des véhicules (Ademe, 2011). Or, l'ACV conséquente réalisée par les chercheurs Chester et Horvath a démontré que l'intégration des infrastructures dans le périmètre de l'étude alourdissait les résultats de 155% (Chester et Horvath, 2009).

C'est pourquoi il semble indispensable de s'intéresser aux impacts environnementaux des infrastructures des transports sur rail, et surtout de veiller à les réduire dès leur conception, dans la mesure où la majorité des impacts pourront y être évités (Pôle Éco-conception, s. d.).

## 2. LES SOLUTIONS D'ÉCO-CONCEPTION DE PROJETS D'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRES

Après avoir présenté dans une première partie les enjeux de l'intégration des considérations environnementales dans les projets de bâtiments et d'infrastructures de transport sur rail, ce deuxième chapitre apporte quelques solutions de conception pour réduire leur empreinte écologique et répondre de manière transversale aux différentes problématiques du ferroviaire.

Dans une première section, plusieurs techniques généralistes de prise en compte de l'environnement dans la conception seront exposées. Celles-ci peuvent s'intégrer aisément dans la démarche d'éco-conception de la plupart des projets et permettent d'en réduire considérablement les impacts. Les sections suivantes détaillent 7 solutions d'éco-conception (au sens où elles répondent à une ou plusieurs problématiques environnementales posées par la technique de conception de référence), présentées à titre d'exemples pour les besoins de l'essai et sélectionnées pour leur pertinence et leur efficacité, leur caractère innovant et leur transversalité sur l'ensemble des enjeux et sur les différents objets de conception (bâtiments, infrastructures, linéaire...). Chacune de ces solutions est présentée avec une description suivie d'une analyse multicritère permettant de l'évaluer selon les 12 critères environnementaux, économiques et techniques les plus souvent considérés comme des enjeux dans les projets de conception de transport (Ademe, 2016) : la gestion des matériaux, la préservation des matières premières et de la biodiversité, l'intégration paysagère, la gestion des eaux, l'emprise au sol, l'entretien et la durabilité, le coût global, les conditions de mise en œuvre, les émissions de GES et de polluants atmosphériques, et enfin, la gestion de l'énergie.

**Tableau 2.1 : Légende de l'analyse multicritère des solutions d'éco-conception**

Légende de l'analyse multicritère	
++	Très positif
+	Positif
0	Impact neutre ou inexistant
-	Négatif
--	Très négatif

À partir de l'analyse multicritère, un avis sera émis en prenant l'angle de la faisabilité technique, de la préservation de l'environnement et des contraintes budgétaires. Un exemple de mise en œuvre dans un projet de bâtiment ou d'infrastructure ferroviaire sera ensuite amené afin d'en tirer un retour d'expérience. Pour terminer, une synthèse globale permettra de résumer les avantages et les inconvénients de chacune des solutions et de les comparer entre elles.



## **2.1 Recommandations générales**

Inspiré du « principe de Pareto » théorisé par Joseph Juran, selon lequel « 20% des causes produisent 80% des effets » (Juran, 1954), ces solutions s'intéressent aux enjeux majeurs du secteur des transports : la préservation des ressources par le choix des matériaux et leur recyclage, la gestion de l'énergie (notamment la consommation d'origine fossile) et la gestion de la ressource en eau. Ces recommandations présentent notamment l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre, de disposer de nombreux retours d'expérience et d'engendrer peu ou pas de surcoût, voire de réaliser des économies sur le long terme.

### **2.1.1 Intégrer un critère carbone**

Pour assurer la continuité de la démarche d'éco-conception de la phase conception à la phase construction, il est possible de définir l'empreinte carbone comme un véritable critère de décision dans le choix des matériaux. Pour ce faire, un « critère carbone » doit être intégré dans les Dossiers de Consultation des Entreprises (DCE) à destination des fournisseurs, dans le cadre des marchés publics. Pour comparer les offres des producteurs, la performance environnementale des matériaux devra avoir le même poids décisif que le coût et les critères techniques. (Carbone 4, 2015) Outre la réduction de l'empreinte globale du projet par la sélection de matériaux aux émissions de gaz à effet de serre les plus faibles, l'autre intérêt d'intégrer un critère carbone dans les DCE est d'encourager les entreprises à réaliser un Bilan Carbone® de leurs matériaux et de créer une concurrence à la performance environnementale entre les différents fournisseurs.

### **2.1.2 Favoriser le matériau bois**

Une des manières de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et les impacts environnementaux de la conception des bâtiments et des infrastructures de transport sur rail est de réduire les proportions de certains matériaux, tels que le béton ou les isolants en laine minérale, au profit du bois et de ses dérivés. En effet, remplacer une construction en béton standard par une ossature bois permet d'observer une diminution de l'empreinte carbone de l'ordre de 10%. À titre de comparaison, l'utilisation de béton optimisé permet seulement d'atteindre 5% de réduction des émissions de GES indirectes du bâtiment, par rapport au matériau classique. (Grandjean, Ledoux et Daunay, 2018)

Le bois est un matériau renouvelable qui peut être utilisé tant pour la réalisation du gros-œuvre que du second-œuvre, présente de nombreux avantages écologiques. Il est notamment défini par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) d'Ile-de-France comme un éco-matériau, c'est à dire :

« Un produit dont les processus de production, de transport, de mise en œuvre, de vie en œuvre, de fin de vie, présentent globalement, face à des matériaux classiques, des performances environnementales supérieures en termes de consommation d'énergie non renouvelable, de consommation de ressources naturelles, d'émissions de gaz à effet de serre, et qui ne remettent pas en cause la santé des occupants et des professionnels assurant leur mise en œuvre. » (CETE d'Ile-de-France, 2010)

Le matériau bois a également pour caractéristique d'être un puits de carbone, c'est-à-dire qu'il continue à le séquestrer même après avoir été coupé. Ainsi, « le CO<sub>2</sub> piégé pendant la croissance de l'arbre reste stocké pendant toute la durée d'utilisation des produits fabriqués à partir du bois », et ce pendant plusieurs centaines d'années. (Office Nationale des Forêts [ONF], s. d.) C'est aussi un excellent isolant thermique, puisqu'à épaisseur égale, sa capacité d'isolation est 15 fois supérieure à celle du béton, 350 fois à celle de l'acier et 1500 fois à celle de l'aluminium (Direction de la Stratégie et du Développement Durable [DSDD] de la Direction Régionale de l'Équipement d'Île-de-France [DREIF], 2010) De plus, le bois peut aussi être recyclé et/ou valorisé énergétiquement en fin de vie, limitant ainsi les déchets de déconstruction. (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017) Les labels environnementaux PEFC (Program for the Endorsement of Forest Certification schemes) et FSC (Forest Stewardship Council) certifient la provenance du bois et assurent une gestion durable des ressources forestières (Natura Sciences, 2018a).

Le bois est non seulement durable, mais il peut également présenter un aspect esthétique et favorise l'intégration paysagère des bâtiments, notamment en zone rurale. D'un point de vue technique, la durabilité du bois est égale, voire supérieure, à celle du béton. Cependant, le bois nécessite un entretien plus important pour le protéger des nuisibles et du rayonnement solaire. (Conseil canadien du bois, s. d.) L'essence du bois doit alors être choisie au moment de la conception de l'ouvrage et déterminée en fonction des caractéristiques climatiques du projet. Un compromis devra être trouvé entre la performance environnementale et la capacité de l'exploitant à assurer un entretien régulier, en optant par exemple pour une ossature bois et un parement en béton. (Natterer, Sandoz et Rey, 2004)

### **2.1.3 Utiliser des matériaux biosourcés**

Les matériaux biosourcés sont des matériaux qui proviennent de la biomasse d'origine végétale (comme le bois, le chanvre ou encore le coton) ou animale (laine de mouton) et qui peuvent être utilisés dans le bâtiment pour le gros-œuvre et le second-œuvre (Bâtir pour la planète, s. d.). Leur utilisation permet de réduire significativement les impacts environnementaux d'un projet, notamment grâce au caractère renouvelable de ces agro-ressources et à des émissions carbone moindres en comparaison avec les matériaux de construction de nature minérale comme le béton. De plus, les biomatériaux peuvent facilement être valorisés en fin de vie, en énergie ou en produit recyclé, voire même être compostés. (Departe, 2014)

Les bâtiments non résidentiels dans lesquels sont mis en œuvre des matériaux biosourcés peuvent faire l'objet d'une labellisation, attribuée en France par Certivéa, sous réserve de respecter les prérequis du label réglementaire prévus à l'article R. 111-22-3 du code de la construction et de l'habitation. Cependant, il est à prévoir que ces agro-ressources présentent un coût plus élevé que les matériaux de construction classiques. (Certivéa, s. d.)

#### **2.1.4 Réduire les besoins énergétiques et produire de l'énergie renouvelable**

L'énergie des bâtiments est également un enjeu considérable de tout projet de transport sur rail. En effet, une gare et ses équipements requièrent une importante consommation d'énergie, majoritairement d'origine nucléaire ou fossile. Or, le secteur du bâtiment représente 44% de l'énergie totale consommée en France, soit bien plus que le secteur des transports qui compte pour environ un tiers de la consommation, et produit chaque année plus de 123 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2016b)

Afin de limiter les émissions de GES et l'extraction des ressources liées à l'exploitation des infrastructures et des bâtiments, il est recommandé dans un premier temps de veiller à assurer leur sobriété énergétique dès la conception. En effet, le meilleur moyen de maximiser l'efficacité énergétique d'un bâtiment est de prévoir une enveloppe performante, qui se traduit par une isolation thermique optimale et une parfaite étanchéité à l'air. Ainsi, elle permet de limiter les déperditions thermiques et de contrôler les flux d'air à l'intérieur du bâtiment. Les gares présentant le plus souvent une architecture composée de larges volumes ouverts à l'air extérieur, le défi représenté par l'optimisation de l'enveloppe est particulièrement difficile. C'est pourquoi, cette approche est plus souvent recentrée sur les locaux accueillant les activités fonctionnelles de la gare et les locaux techniques. Les moyens à disposition pour améliorer la performance de l'enveloppe sont : la compacité du bâtiment, l'inertie du bâtiment (constitution des parois), la résistance thermique des parois (qualité de l'isolation) et la réduction des ponts thermiques. (Agence de l'énergie Val de Marne Vitry, s. d.)

Il est ensuite possible de produire directement sur site l'énergie renouvelable nécessaire à l'approvisionnement des équipements de la gare et de ses équipements, en ayant par exemple recours à une production d'énergie d'origine solaire ou éolienne.

L'énergie solaire peut être créée grâce aux technologies photovoltaïques ou thermiques grâce à des panneaux qui captent les rayonnements solaires. Les panneaux solaires photovoltaïques produisent du courant électrique continu, tandis que les capteurs solaires thermiques absorbent l'énergie solaire qui est transmise à un fluide caloporteur (air ou eau). La chaleur est ensuite utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments. L'eau chaude est produite dans un ballon classique comprenant un approvisionnement d'appoint par du gaz ou de l'électricité. (Connaissance des énergies, 2015) Installés en façade ou sur la toiture, ces installations ne nécessitent pas d'emprise au sol et ne sont pas contraints par les limites du foncier. Les panneaux solaires peuvent aussi être directement intégrés aux équipements, permettant ainsi d'assurer l'autonomie énergétique des candélabres, bornes et panneaux d'affichage (Solaris, s. d.). Une étude d'approvisionnement en énergie déterminera la rentabilité et le type de panneaux le plus adapté pour les usages du bâtiment et de ses équipements. L'installation de panneaux solaire (adaptable en fonction des besoins) permet de produire une énergie dite « propre », puisqu'elle n'émet pas de gaz à effet de serre et est renouvelable (Jancovici, 2003), et ainsi de réaliser des économies sur

l'approvisionnement auprès du réseau public. Cette réduction des coûts d'exploitation de la gare et de ses équipements permettra, sur le long terme, de rentabiliser les coûts d'installation (Ademe, 2017b) La technologie solaire photovoltaïque ou thermique est aujourd'hui fiable et maîtrisée et dispose de nombreux avis techniques qui la rendent facile à mettre en œuvre, quel que soit le type de projet. La formation du personnel responsable de la maintenance est aisée. En outre, la visibilité des panneaux solaires permet de renvoyer une image positive du bâtiment aux usagers. (Ademe, 2013) Le seul frein technique aujourd'hui est le stockage de l'énergie, encore difficilement mise en œuvre et qui donne lieu à de nombreux projets de recherche de la part de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCORE) (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016c). C'est pourquoi la production d'énergie solaire pour l'autoconsommation est surtout recommandée dans les régions géographiques dont le climat assure un rayonnement solaire suffisant et constant au cours de l'année.

L'énergie éolienne, quant à elle, est l'une des formes les plus anciennes d'énergie utilisée par l'Homme. Tout comme l'énergie solaire, elle est entièrement renouvelable, non polluante, et se substitue aux énergies fossiles dans un but d'indépendance énergétique. L'éolien a particulièrement sa place dans les projets ferroviaires nationaux puisque la France bénéficie du deuxième gisement le plus important d'Europe, après le Royaume Uni. Les zones les plus propices à l'installation de dispositifs de production d'énergie éolienne sont « la façade ouest du pays, de la Vendée au Pas-de-Calais, en vallée du Rhône et sur la côte languedocienne ». Bien que le vent soit une ressource qui n'est pas constante (qui peut varier de trop faible à trop élevée), elle est aujourd'hui de mieux en mieux contrôlée et de nouvelles technologies permettent de la réguler. De plus, l'intensité du vent s'accorde naturellement à la demande en énergie, puisque les vents forts sont plus fréquents en hiver. (Ademe, 2015)

### **2.1.5 Limiter la consommation d'eau**

L'eau potable, précieuse à la vie terrestre et disponible en quantité finie, est aujourd'hui une ressource mise en péril par le développement des activités humaines et limitée pour près d'un individu sur deux. La difficulté d'accès à l'eau potable est devenue la première cause de mortalité dans le monde avec plus de 3,6 millions de décès chaque année. Le problème, en partie quantitatif en raison des inégalités de répartition de la ressource, est surtout qualitatif et résulte principalement d'une mauvaise gestion de l'eau. (Baechler, 2012) C'est la raison pour laquelle il est indispensable de mettre en place dans chaque projet des mesures visant à limiter la consommation et la pollution de l'eau potable.

Pour cela, outre les changements comportementaux visant à réduire la consommation d'eau, il est possible d'avoir recours à des dispositifs hydro-économes qui permettent d'effectuer des économies d'eau de manière passive, c'est-à-dire qui ne demande pas d'effort particulier à l'utilisateur. Les sanitaires représentent notamment une part importante de la consommation d'un bâtiment et des dispositifs bons marchés permettent de réaliser des économies significatives : régulateurs de débit, accélérateur de débit pour chasse d'eau, urinoir sans eau, etc. Pour l'arrosage des espaces verts, il est possible d'avoir recours

à des techniques d'irrigation modernes, telles qu'un programmeur pour doser l'eau selon la saison et les données météo fournies par les capteurs, un goutte-à-goutte (qui permet d'apporter la juste quantité désirée en minimisant les pertes par évaporation et ruissellement), ou encore un tensiomètre pour évaluer la demande en eau en fonction de la pression des racines. (Systra, Dispositifs hydro-économes, 2017) Enfin, une attention particulière devra être portée à la prévention et à l'intervention en cas de fuites.

La réutilisation et le recyclage de l'eau sont d'autres méthodes pour en limiter la consommation. Ainsi, la même eau peut être utilisée à plusieurs fins. Pour cela, il est possible de récupérer à la fois les eaux de pluie et les eaux grises (c'est à dire issues de l'usage domestique, excepté les eaux de toilettes (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment [CSTB], 2013), comme par exemple les eaux issues des machines de lavage des trains dans les Sites de Maintenance et de Remisage). Après un léger traitement, directement sur site et en circuit fermé, ces eaux de qualité moindre pourront être réutilisées pour des usages qui ne nécessitent pas d'eau potable (nettoyage des rames, mais aussi alimentation des chasses d'eau et irrigation). (CNRS, s. d.)

### **2.1.6 Recycler les matériaux**

Le recyclage de matériaux sur un chantier peut être intégré de deux manières, soit en ayant recours à des matériaux recyclés, soit en recyclant les matériaux de construction, sur place ou en site spécialisé, pour en éviter la mise en décharge.

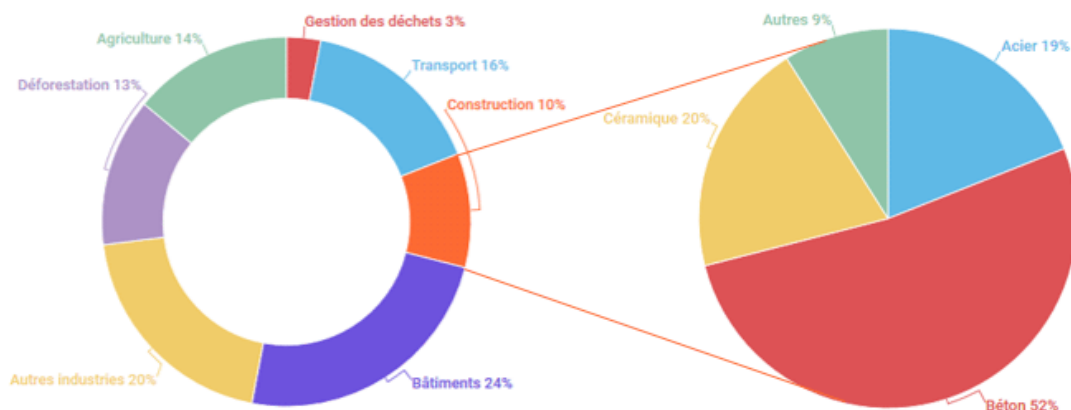
L'utilisation de matériaux recyclés a aujourd'hui fait ses preuves dans l'aménagement des voiries, dont l'efficacité et la durabilité ont été démontrées sur de nombreux chantiers. L'usage de matières recyclées semble également ancré culturellement dans le secteur des travaux publics, où les pratiques de remploi y sont développées. (Ademe, 2017a) En ce qui concerne le secteur du bâtiment, le projet national RECYBÉTON, soutenu par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) vise à développer la fabrication de béton à partir de granulats recyclés. Encore en expérimentation, ce nouveau procédé présente déjà des résultats encourageants. (RECYBÉTON, s. d.) Les déchets liés à la déconstruction d'un bâtiment ou d'une infrastructure de transport peuvent également être en partie valorisés et réutilisés, et cette pratique est à la hausse sur les dix dernières années. En effet, en 2017, 61% des déchets inertes produits par le secteur du BTP ont fait l'objet d'une réutilisation ou d'une valorisation (« recyclage matière, remblaiement de carrière »), contre 49% en 2008. (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2017b)

La bonne gestion de la fin de vie des matériaux est importante pour le maître d'ouvrage à qui revient, comme tous les maillons de la chaîne de construction, « la responsabilité de gérer le traitement et l'élimination des déchets », en vertu de la circulaire du 15/02/00 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (BTP). (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2000)

Du point de vue du développement durable, la réutilisation, le recyclage et la valorisation de la matière permettent de limiter l'extraction de matières premières, et ainsi de réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre, tout en évitant l'enfouissement et la mise en décharge des matériaux. De plus, ces procédés favorisent la maîtrise des coûts, et participent à la croissance de l'emploi et du développement industriel des technologies (Ademe, s. d.)

## 2.2 Solution d'éco-conception n°1 : le « béton vert »

L'ensemble du secteur de la construction représente à l'échelle mondiale 10% des émissions totales de gaz à effet de serre, dont plus de 50% de cette part provient de l'utilisation de béton. C'est pourquoi les mesures d'éco-conception visant à réduire l'impact environnemental du béton sont particulièrement pertinentes dans la conception de projets ferroviaires, qui ont généralement recours à des volumes de béton importants. (Duverger, 2017)



**Figure 2.1 Émissions de gaz à effet de serre des différentes industries (à gauche) et zoom sur l'industrie de la construction (à droite) (Duverger, 2017)**

L'impact du béton s'explique notamment par l'utilisation de ciment, qui ne représente que 11% de la masse totale du béton, mais compte pour plus de 98% de ses émissions de GES. En cause, la « cuisson du clinker à 1450°C via des combustibles fossiles ou de substitution » et « la décarbonatation du calcaire lors de la cuisson », respectivement responsables à 40% et 60% de l'impact carbone du ciment. Actuellement, outre l'optimisation des proportions de ciments dans les bétons pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation de bétons à faible impact carbone (également appelés « bétons verts ») est une solution efficace pour augmenter la performance environnementale des ouvrages. (Duverger, 2017)

Ces bétons bas-carbone consistent à utiliser pour leur fabrication des ciments à teneur réduite en clinker. Cette matière est un « constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange d'acide silicique d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux. » (Actu environnement, s. d.). Il est alors remplacé par des produits d'addition comme des laitiers de hauts fourneaux, des cendres volantes ou encore des matériaux pouzzolaniques. La

fabrication du clinker (notamment sa cuisson) étant extrêmement consommatrice d'énergie et émettrice de GES, la réduction de sa proportion dans les ciments permet d'en réduire significativement l'impact environnemental. En outre, le clinker étant le composant le plus onéreux dans la fabrication du ciment, le coût d'un béton vert est similaire, voire inférieur à un béton classique. (Le Roy, 2013 et R'Mili, Sahli et Hassis, 2013)

**Tableau 2.2 : Analyse multicritère de l'utilisation de béton vert**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	L'optimisation des proportions de ciment dans les bétons permet de réduire significativement le besoin en matériaux et les impacts qui leur sont liés	++
Préservation des matières premières	Utilisation de déchets comme matière première, limitation des consommations en argile et en calcaire composants le clinker	++
Préservation de la biodiversité	n/a	0
Paysage	Limite la création de nouveaux sites d'extraction des matières premières	+
Gestion des eaux	n/a	0
Emprises	n/a	0
Entretien & durabilité	Identique aux bétons comportant des ciments classiques	0
Coût global	Les prix des ciments comportant moins de clinker sont similaires, voire inférieurs aux bétons classiques, puisqu'il s'agit du composant le plus onéreux	+
Conditions de réalisation	Temps d'atteinte de la résistance nominale du béton plus long avec du ciment bas carbone	--
Émissions de gaz à effet de serre	Diminution importante des émissions de gaz à effet de serre du ciment, liés à la fabrication du clinker	++
Pollution atmosphérique	Diminution des pollutions dues à la fabrication du clinker	+
Énergie	Diminution importante de consommations d'énergie dues à la fabrication du clinker	++

### 2.2.1 Avis technique

Aujourd'hui, il n'existe pas de verrou technique à l'utilisation de bétons à faible taux de clinker dans les projets ferroviaires. En effet, la résistance et la durabilité de ce type de ciment (dont la formulation intègre jusqu'à 75% de laitier de haut-fourneau ou 50% de cendres volantes pour remplacer le clinker) sont au moins équivalentes (voire meilleures) aux ciments classiques (composés à 95% de clinker). La seule différence notable est le temps de séchage à l'air libre allongé en raison d'un « processus d'hydratation des pâtes de ciment » plus lent, dont il faudra tenir compte dans les plannings de travaux. Des expérimentations menées par le Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-ressources et

Bâtiment (LEPTIAB) de l'Université de La Rochelle sur la « carbonatation de bétons à forts taux de substitution de ciment par des additions minérales » ont permis de conclure qu' « il est possible d'affirmer que les Écobétons à forts taux de substitution du ciment par des cendres [volantes] ou du laitier de haut-fourneau sont en mesure de remplacer, dans certains cas, les bétons usuels ». (Younsi, 2011)

### **2.2.2 Avis environnemental**

L'association de l'optimisation des dosages en ciment et l'utilisation de bétons bas carbone permet d'importants gains environnementaux. La réduction du taux de clinker dans les ciments comporte de nombreux avantages, notamment au niveau des économies d'énergie et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre lié à la fabrication du clinker. Les recherches du bureau d'étude ARTELIA Bâtiments Durables ont notamment démontré que le recours à un ciment de haut fourneau (dont la teneur en clinker est de 20 à 34%) comme alternative au ciment classique, dit « Portland » (composé intégralement de clinker) permet de réduire l'impact carbone du béton de 70%. (Duverger, 2017) En outre, la démocratisation de ce type de béton permettra à terme de réduire le besoin en extraction de matières premières pour la fabrication du clinker.

### **2.2.3 Avis économique**

En plus d'être efficaces dans la réduction des impacts environnementaux, les bétons verts sont également avantageux sur le plan économique. En effet, le clinker étant remplacé par des produits d'addition moins onéreux, ce type de béton coûte donc moins cher à produire pour le cimentier. Si cette différence est répercutée sur le prix de vente, l'utilisation de béton à faible taux de clinker pour la construction des ouvrages d'art et de l'ensemble des éléments en béton moulé permet de réduire le coût global du projet. (R'Mili, Sahli et Hassis, 2013)

### **2.2.4 Exemple et retour d'expérience**

Pourtant connu depuis les années 70, le béton bas carbone a longtemps été confronté à la réticence des constructeurs, malgré une durabilité et des caractéristiques techniques équivalentes aux bétons traditionnellement utilisés. Aujourd'hui, avec l'essor d'un marché de produits « verts » pour répondre à des préoccupations environnementales grandissantes et aux évolutions de la réglementation, le béton à faible taux de clinker est de plus en plus mis en valeur par les producteurs et géants du BTP. Le groupe Lafarge a notamment expérimenté un « béton à carbone réduit » pour la construction du premier stade à énergie positive de France, inauguré au Havre en 2012, dans lequel une partie du clinker est remplacée par « des cendres volantes provenant des centrales thermiques, [des] laitiers issus de la fabrication de la fonte et qui sont réduits en granules ou encore des roches volcaniques telles les pouzzolanes ». (Galus, 2008, 13 mars et Lafarge, 2013)



Le cimentier Ecocem, spécialisé dans la fabrication de béton écologique pour l'éco-construction, a notamment développé un béton vert dans lequel 50% du ciment courant à base de clinker est remplacé par du laitier moulu, dont l'empreinte carbone est 40 fois moins importante. Selon une étude du producteur, les émissions du béton Ecocem sont évaluées à 565 tonnes de CO<sub>2</sub> pour un chantier de 5000m<sup>3</sup> (équivalent à un immeuble de deux étages), contre 1100 tonnes pour un ciment classique, dit « Portland CEM II ». Le recours à ce béton éco-conçu a permis une réduction de près de 50% des émissions de GES et d'éviter l'extraction et le transport de 860 tonnes de calcaire et d'argile. (Ecocem, 2011)

### **2.3 Solution d'éco-conception n°2 : le soutènement des quais par un mur en gabion**

Dans la majorité des projets de linéaire ferroviaire, l'optimisation du soutènement des quais présente un fort potentiel de réduction des impacts environnementaux, notamment parce qu'il est d'usage d'avoir recours à un mur en béton armé pour soutenir les voies. Cet ouvrage est non seulement consommateur de matières premières non renouvelables et nécessite de mettre en œuvre des procédés énergivores, il exerce aussi une pression sur les phénomènes de changements climatiques. En effet, comme illustré en figure 2.1, le ciment mis en œuvre dans les bétons traditionnel contribue à lui seul pour près de 5% du total des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropiques à l'échelle mondiale (Duverger, 2017). De plus, sa durée de vie peut être limitée en cas de modification ou de création voies de circulation de trains.



**Figure 2.2 Mur en gabions multifonctionnel** (SNCF Réseau, s. d.)

Il existe aujourd'hui plusieurs alternatives plus durables au béton armé pour les besoins de soutènement, dont l'une des plus performantes d'un point de vue environnemental et esthétique est le mur de soutènement en gabion. Le principe consiste à poser des granulats encagés « qui utilisent leur propre masse pour reprendre la poussée exercée par le massif de terre à retenir » (Inexence, s. d.). Les avantages considérables de cette solution sont la possibilité d'utiliser les pierres disponibles sur le chantier (issues de la déconstruction par exemple), réduisant ainsi les impacts liés à l'extraction et l'acheminement des matériaux, la facilité et la rapidité de mise en œuvre (puisque le gabion ne nécessite pas d'avoir recours à

une main d'œuvre qualifiée et ne requiert pas un certain temps de pose, comme avec le béton) et enfin, sa modularité, puisque les casiers une fois posés pourront être déplacés et réutilisés sur d'autres projets. (Paradis Bolduc, 2015) L'utilisation d'un mur en gabion est notamment pertinente pour le soutènement temporaire de quais, comme par exemple dans l'attente de la construction d'une nouvelle voie.

**Tableau 2.3 : Analyse multicritère du soutènement de quais par un mur en gabion**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	Possibilité de réutiliser des matériaux de déconstruction	+
Préservation des matières premières	En cas de soutènement temporaire, le mur en gabion peut être déplacé et réutilisé sur un autre projet	++
Préservation de la biodiversité	Crée un habitat favorable pour la faune locale	+
Paysage	Bonne insertion paysagère	+
Gestion des eaux	n/a	0
Emprises	Plus large qu'un mur de soutènement classique	-
Entretien & durabilité	Durabilité équivalente aux murs de soutènement en béton	+
Coût global	Environ 25% plus cher qu'un mur en béton armé	--
Conditions de réalisation	Mise en œuvre plus simple et plus rapide qu'un mur béton	++
Émissions de gaz à effet de serre	Impact carbone des matériaux moindre par rapport au béton	++
Pollution atmosphérique	n/a	0
Énergie	Quasiment aucun traitement des matériaux nécessaire. Approvisionnement local possible pour réduire les dépenses énergétiques d'acheminement des matériaux	++

### 2.3.1 Avis technique

La mise en œuvre d'un mur en soutènement en béton est simple, cependant il faut s'assurer de la conformité à la norme NF P 94-281 relative aux ouvrages de soutènement. Les dimensions du mur doivent assurer sa stabilité « sous l'action des efforts de poussée (actions permanentes), des surcharges d'exploitation (actions variables) ainsi que les chocs et actions sismiques (actions accidentelles) ». De plus, le « contexte hydro-géotechnique » doit être considéré pour déterminer « [la] géométrie et [la] structure » du mur, notamment en prenant en compte la « situation du projet (présence d'eau, risques naturels, contraintes environnementales et architecturales) » et les « caractéristiques géologiques et géotechniques des sols en place ». (Inexence, s. d.)

Ainsi, il n'existe pas de frein technique à la mise en œuvre d'un mur en gabion. Le seul inconvénient de cette solution est l'emprise au sol, plus importante qu'avec un mur en béton. Il est donc important de s'assurer de la faisabilité technique de la solution compte tenu des disponibilités en foncier pour la réalisation du mur de soutènement.

### 2.3.2 Avis environnemental

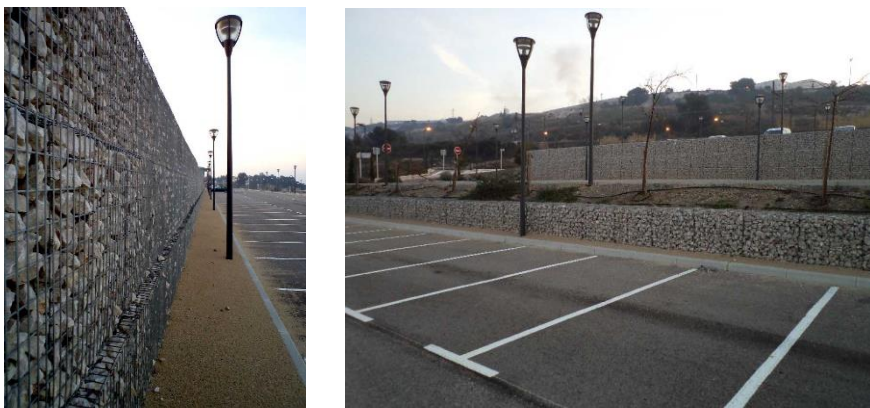
Le mur en gabion présente un avantage non négligeable en termes de gaz à effet de serre. En effet, on estime que son impact carbone est 10 fois moins important que celui d'un mur en béton (Systra, fiche éco-conception mur en gabion, 2018). De plus, son caractère modulable (démontable et réutilisable sur d'autres projets comme la création d'une nouvelle voie par exemple) permet de réduire le besoin en matières premières et ainsi limiter l'extraction des ressources, mais également de réaliser des économies d'énergie. Enfin, le mur en gabion permet de créer un habitat favorable pour la faune locale, tel que le lézard des murailles en méditerranée. Cependant, en cas de retrait du mur en gabion, un écologue devra être consulté afin de prendre les mesures nécessaires de protection des espèces (S. Liage, conversation, 04 avril 2018).

### 2.3.3 Avis économique

L'inconvénient d'un mur en gabion est qu'il coûte environ 25% plus cher qu'un mur en béton (Devis travaux, 2015). Cependant, cette solution est financièrement intéressante pour un soutènement temporaire, puisque le mur en gabion pourra être retiré pour être réutilisé sur un autre projet, contrairement au mur en béton qui nécessitera d'engager des frais pour sa démolition.

### 2.3.4 Exemple et retour d'expérience

Cette solution a été mise en œuvre dans plusieurs projets de la SNCF. Sur la ligne ferroviaire Monnenheim-Sarreguemines, un mur en gabion d'une dizaine de mètres de haut a été installé pour consolider un talus soutenant une voie ferrée, affecté par une fissure et des tassements. Dans le contexte de ce projet, le mur en gabion a permis d'éviter l'interruption du trafic pendant les travaux, notamment parce qu'il ne nécessitait pas de creuser des fondations. (AquaTerra Solutions, s. d.) Sur le parking de la gare de Vitrolles, dans les Bouches-du-Rhône, des murs de soutènement de trois mètres de haut ont également été installés par la Compagnie des Forestiers. (La Compagnie des Forestiers, s. d.)



**Figures 2.3 et 2.4 Murs en gabions sur le parking de la gare de Vitrolles**

(La Compagnie des Forestiers, s. d.)

## 2.4 Solution d'éco-conception n°3 : la végétalisation des plateformes de tramway

Avec le métro, le tramway est le moyen de transport qui s'est le plus développé en France depuis 1995. Il est en effet de plus en plus mis en œuvre dans les villes pour proposer une alternative électrique au transport sur route, à l'heure de la raréfaction des ressources fossiles. (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017)

La végétalisation des plateformes de roulement du tramway comporte de nombreux avantages. D'une part, son esthétisme naturel favorise l'insertion paysagère de la ligne et développe d'autre part la biodiversité dans les zones urbaines. De plus, les voies végétales permettent de réduire les nuisances sonores et vibratoires liées à la circulation des rames de tramway. Enfin, il s'agit d'une solution plus économique qu'un revêtement minéral, à base de béton par exemple. (Plante & Cité, 2016)

Cependant, les plateformes végétalisées ne sont pas sans présenter des contraintes majeures, notamment en ce qui tient à la préservation de la ressource en eau et à l'entretien des gazons. L'eau, et de surcroît l'eau potable, est une ressource limitée, dont la préservation revêt des enjeux environnementaux et économiques majeurs. Or, la mise en œuvre de végétalisation par gazon de placage sur une plateforme béton nécessite un approvisionnement conséquent (0,6 à 1 m<sup>3</sup> eau/an/m<sup>2</sup>). Il s'agit donc de proposer des complexes végétaux et systèmes d'arrosage qui minimisent la consommation en eau, en s'assurant de leur adéquation avec le climat local et leur résistance à la sécheresse. Les fétuques et les sedums sont des exemples de végétaux qui ne requièrent que peu d'eau pour présenter une qualité esthétique satisfaisante. (Plante & Cité, s. d.) Dans la mesure du possible, afin d'éviter de détourner de l'eau propre à la consommation humaine, il est fortement conseillé d'envisager un captage d'eau non potable, par exemple sur le réseau d'assainissement. L'ajout de matériaux hydro rétenteurs à la composition du substrat, grâce à leurs parois semi-perméables, permet d'absorber jusqu'à 500 fois leur poids initial en volume d'eau et redistribuer cette réserve lentement au tissu végétal. Ces matériaux constituent des réservoirs d'eau qui réduisent l'évaporation et relâchent leur charge hydraulique dans le support de culture. (Wiki Water, s. d.)



**Figure 2.5** Plateforme végétalisée - ligne T1 du Tramway de Caen (Normandie Aménagement, s. d.)

Bien que le coût d'installation d'une plateforme végétale soit inférieur à un revêtement minéral, les dépenses d'entretien annuelles des gazons peuvent s'étendre de 2 à 4€/m<sup>2</sup>. Afin de les réduire, il convient de privilégier des essences de faible hauteur (maximum 15cm) avec une bonne capacité de persistance et de résistance aux piétinements et au roulement du tramway. Le choix des végétaux doit aussi dépendre de la nature du substrat et du type de revêtement. Il est préconisé d'utiliser des mélanges de différentes espèces pour avoir un aspect agréable et un comportement satisfaisant, quelles que soient les conditions météorologiques. (Plante & Cité, 2016 et Plante & Cité, s. d.)

**Tableau 2.4 : Analyse multicritère de la végétalisation des plateformes de tramway**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	n/a	0
Préservation des matières premières	Revêtement naturel et végétal (donc ressource renouvelable)	++
Préservation de la biodiversité	Favorise le développement de la biodiversité urbaine	++
Paysage	Très bonne insertion paysagère	++
Gestion des eaux	Requiers un arrosage régulier des végétaux, qui peut néanmoins être minimisé en fonction des essences choisies	--
Emprises	Permet d'utiliser l'emprise des plateformes de tramway pour végétaliser les zones urbaines	+
Entretien & durabilité	Nécessite un entretien fréquent (maintenance importante)	--
Coût global	Moins cher à l'installation qu'un revêtement minéral, mais implique des dépenses d'entretien régulières (coût dépendant des végétaux choisis)	+/-
Conditions de réalisation	Facile à mettre en œuvre	+
Émissions de gaz à effet de serre	Capture du CO <sub>2</sub> par les végétaux de la plateforme	++
Pollution atmosphérique	Pas d'émission de polluants	+
Énergie	Économies d'énergie réalisées sur l'installation de la plateforme végétale, comparativement à un revêtement minéral qui requiert des équipements énergivores	++

#### 2.4.1 Avis technique

De plus en plus plébiscitée dans les récents projets de tramway, la végétalisation des plateformes dispose aujourd'hui de nombreux retours d'expériences facilitant sa mise en œuvre. En dehors des contraintes propres au projet (qualité du substrat, contraintes du bâti en centre-ville par exemple), il n'existe pas de réel frein technique à cette solution. (Systra, fiche végétalisation des plateformes de tramway, 2017)

### **2.4.2 Avis environnemental**

La végétalisation d'une plateforme de tramway présente de nombreux avantages environnementaux. D'une part, cela permet de réduire le recours à un revêtement minéral qui requiert l'utilisation de ressources fossiles actuellement disponibles en quantité limitée. De plus, la mise en œuvre de ce type de revêtement nécessite l'usage de machines énergivores. À l'inverse, une plateforme végétale permet de développer la biodiversité urbaine et de capter les émissions de carbone. En effet, « à surface du sol égale, les gazons permettent une séquestration de CO<sub>2</sub> dans le sol deux fois plus importante que celle d'une forêt de feuillus de 120 ans et autant qu'une plantation de conifères de 25 ans » (Caron, 2017). Cependant, il convient de choisir de manière éclairée les essences végétales pour éviter d'exercer une pression sur la ressource en eau, notamment lorsque celle-ci provient d'un réseau dédié à la consommation humaine. L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) conduit notamment une expérimentation depuis 2016 sur les 140 000m<sup>2</sup> de plateforme végétalisée du tramway de Dijon sur les « alternatives aux gazons de graminées conventionnels » dans le but de « minimiser l'impact environnemental lié à l'entretien des plates-formes engazonnées et de favoriser ainsi la biodiversité urbaine (en lien avec les corridors écologiques de la trame verte urbaine). » (INRA, 2016)

### **2.4.3 Avis économique**

Bien que, dans la littérature, la mise en œuvre d'une plateforme végétalisée est considérée comme plus intéressante économiquement qu'un revêtement en béton, il convient néanmoins de considérer que des dépenses annuelles d'entretien et de consommation d'eau doivent être prévues. Pour assurer l'intérêt économique de cette solution, il est primordial que le choix des végétaux soit fait en fonction de la résistance des essences et de leur fréquence de tonte et d'arrosage. (Plante & Cité, s. d.)

### **2.4.4 Exemples et retours d'expérience**

Mise en service en 2000, la première ligne de tramway de l'agglomération orléanaise, qui comptait près de 50 000m<sup>2</sup> de plateforme végétalisée, a largement contribué à améliorer l'esthétisme des quartiers résidentiels qu'elle traverse. Cependant, force a été de constater que les coûts d'entretien annuels des gazons représentaient environ 240 000 € par an, dont 30 000 € de consommation d'eau potable. Pour les réduire, un investissement de 70 000€ a été réalisé en 2008 dans un système de gestion centralisé pour l'arrosage automatique. Celui-ci permet d'économiser 59 000€ chaque année, diminuant ainsi les dépenses d'entretien du gazon de la plateforme de 3,40 €/m<sup>2</sup> en 2006 à 2,41 €/m<sup>2</sup> en 2009. (Plante & Cité, s. d.)

Lors de la conception de la deuxième ligne de tramway de l'agglomération d'Orléans livrée en 2012, qui comprenait cette fois 38 000m<sup>2</sup> de plateforme à végétaliser, une réflexion poussée a été menée sur les alternatives de végétalisation. Pour cela, une expérimentation de 260m<sup>2</sup> in situ a été réalisée, visant à comparer différentes espèces de végétaux pour répondre aux objectifs suivants : avoir des « qualités

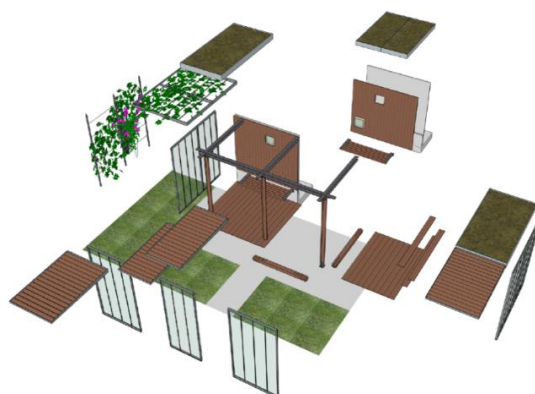


paysagères tout au long de l'année » tout en étant « compatible avec le passage des tramways et les objectifs de biodiversité », « limiter l'arrosage automatique [et entraîner] une forte réduction des coûts d'entretien », sans pour autant engendrer de surcoûts d'investissements. (Plante & Cité, s. d.) Réalisé par l'organisme national d'études et d'expérimentations Plante & Cité, l'étude portait sur 15 planches d'essai composées de différents substrats et espèces végétales, tels qu'un tapis précultivé de sedums, des graminées xérophiles, l'association de graminées et de plantes à fleurs acidophiles et/ou à fleurs calcicoles, ainsi que des graminées et plantes à fleurs neutrophiles. Au terme de cette expérimentation de 2 ans, les résultats récoltés par les ingénieurs ont permis de conclure que les synergies optimales à mettre en œuvre pour la végétalisation des plateformes de tramways sont celles des graminées et vivaces neutrophiles et xérophiles, composée de 35 espèces de vivaces « très résistants aux gels et à la sécheresse », et d'un « mélange gazon rustique homogène » comprenant « 4 variétés de graminées plus résistantes à la sécheresse et moins gourmandes en entretien » que la plateforme végétalisée de la première ligne Orléanaise. De plus, « cette sélection aura un rendu homogène de tapis vert, mais avec des caractéristiques plus rustiques, adaptées aussi bien à des sols pauvres qu'à des sols ordinaires », et convient parfaitement à un environnement urbain qui l'oblige à subir un piétinement fréquent. (Plante & Cité, s. d.)

## 2.5 Solution d'éco-conception n°4 : la conception de halte éco-durable

Une halte éco-durable, autrement appelée « halte écologique », est un bâtiment ferroviaire pour lequel une attention particulière a été portée à la conception pour intégrer l'environnement et réduire les impacts de sa construction et de son exploitation. L'objectif d'une halte éco-durable est d'atteindre une haute qualité environnementale tout en améliorant le confort et la qualité des services rendus aux usagers. (AREP, 2008)

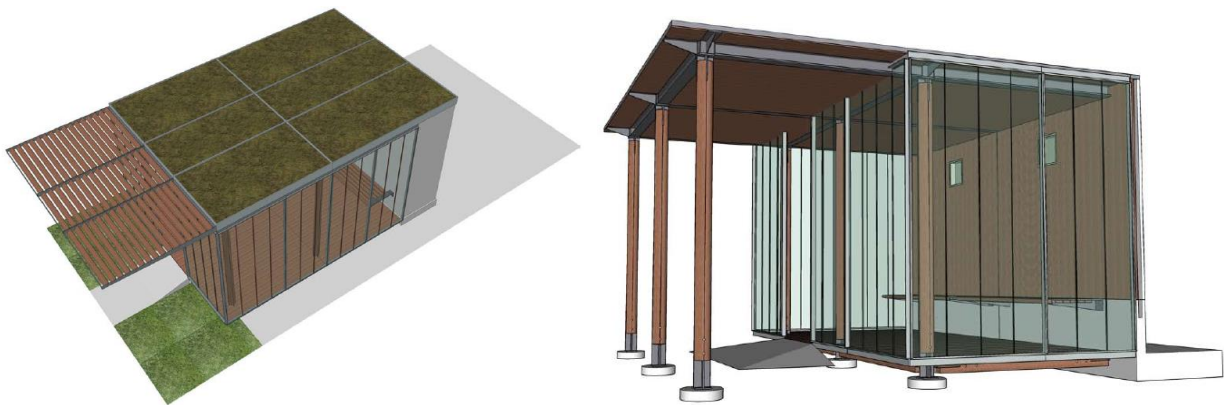
Le premier atout d'une halte écologique est son caractère modulable. Elle peut être préfabriquée en atelier puis assemblée sur place, permettant ainsi une installation rapide et une réduction considérable des nuisances associées au chantier. Elle est également conçue de manière à pouvoir s'adapter aux variations de flux des voyageurs grâce à la possibilité d'ajouter des modules supplémentaires. (AREP, 2008)



**Figure 2.6 Halte éco-durable** (Systra, fiche éco-conception halte éco-durable, 2018)

Dès la conception de la halte, un certain nombre d'actions d'éco-conception doit être prévu pour obtenir un haut niveau de performance environnementale :

- Choisir des matériaux écologiques pour la fabrication de la halte : ceux-ci doivent être en priorité recyclés et/ou recyclables. Il convient également de favoriser les ressources renouvelables, telles que le bois, et de privilégier un approvisionnement local, mais également de considérer le contenu carbone et la toxicité des matériaux (Wignacourt, 2009) ;
- Limiter au maximum l'implantation au sol en concevant une halte sur socles (AREP, 2008) ;
- Réduire le besoin énergétique de la halte en installant des puits de lumière permettant d'amener la lumière naturelle dans des espaces clos, des équipements basse-consommation et des détecteurs de présence. Le positionnement de la halte devra être étudié en fonction de l'ensoleillement du site et des vents dominants (Ademe, 2018b) ;
- Encourager le développement de la biodiversité et l'intégration paysagère grâce à une couverture ou à des façades végétalisées et des espaces verts. En sus, la végétalisation de la halte permet de garantir l'isolation thermique du bâtiment, tant en été qu'en hiver. Le choix des essences végétales devra être déterminé en fonction des conditions climatiques du site, et les espèces qui ne nécessitent pas ou peu d'entretien et d'arrosage doivent être privilégiées. Un système de récupération des eaux de pluie peut également être installé pour l'arrosage des espaces verts (CSTB, s. d.) ;
- Enfin, installer des panneaux solaires en toiture, pour assurer l'autonomie énergétique du bâtiment. L'énergie produite permettra de répondre aux besoins d'éclairage et de chauffage ou climatisation du bâtiment, ainsi qu'à alimenter les équipements d'affichage et de billetterie (Ademe, 2013).



**Figures 2.7 et 2.8 Halte éco-durable** (Systra, fiche éco-conception halte éco-durable, 2018)



**Tableau 2.5 : Analyse multicritère de la halte éco-durable**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	Approvisionnement local, matériaux écologiques	++
Préservation des matières premières	Utilisation de matériaux renouvelables, recyclés, et/ou recyclables	++
Préservation de la biodiversité	Favorise la biodiversité grâce aux façades végétalisées et aux espaces verts	+
Paysage	Bonne insertion paysagère	+
Gestion des eaux	Récupération des eaux de pluie pour l'entretien des espaces verts	+
Emprises	Limitation de l'implantation au sol grâce à l'installation de la halte sur des socles	+
Entretien & durabilité	La maintenance et l'entretien peut être plus important et plus fréquent, notamment en cas de façade végétalisée	--
Coût global	Le coût global sera plus élevé qu'une halte classique, dépendamment des matériaux et des équipements choisis	--
Conditions de réalisation	Nécessite de sortir du cadre de conception classique	-
Émissions de gaz à effet de serre	Réduction des gaz à effet de serre en fonction des matériaux (comme le bois par exemple) et grâce à la production d'énergie renouvelable	++
Pollution atmosphérique	Diminutions des émissions de polluants liés aux matériaux	++
Énergie	Autoconsommation d'énergie renouvelable si installation de panneaux solaires	++

### 2.5.1 Avis technique

La mise en œuvre technique d'une halte éco-durable est aujourd'hui facilitée par quelques retours d'expérience en France, notamment grâce aux différents projets de haltes éco-durables du bureau d'étude pluridisciplinaire AREP, filiale de la SNCF. De plus, l'ensemble des actions préconisées (utilisation de matériaux écologiques, recours à l'énergie solaire, conception bioclimatique, végétalisation, etc.) ont fait leurs preuves sur de nombreux projets, qu'elles aient été mises en œuvre conjointement ou séparément. Cependant, il convient de noter que les caractéristiques du projet (tel que la localisation géographique et de ce fait, le type de climat) doivent systématiquement être considérées pour définir les solutions d'éco-conception optimales et les matériaux adaptés au contexte.

### 2.5.2 Avis environnemental

Un bâtiment ferroviaire éco-durable est conçu de manière à intégrer l'ensemble des considérations environnementales (émissions de GES et de polluants, préservation des ressources, biodiversité, gestion de l'eau et de l'énergie, etc.) pour en réduire significativement les impacts. Chacune des dispositions d'une

halte éco-durable est pertinente sur au moins un aspect environnemental. La combinaison de ces actions permet d'intégrer l'environnement de manière globale dans la conception du bâtiment ferroviaire. En outre, la conception d'une halte ou d'une gare éco-durable permet au maître d'ouvrage et/ou à l'exploitant de faire valoir son engagement envers l'environnement et de mettre en valeur ses bonnes pratiques en matière d'éco-conception. C'est notamment une des raisons qui poussent la SNCF à se lancer dans des expérimentations pour l'amélioration des performances environnementales de bâtiments ferroviaires. (SNCF, s. d.)

### 2.5.3 Avis économique

L'inconvénient d'une halte éco-durable est son coût global. En effet, il sera généralement plus élevé que pour une halte classique, notamment en raison du prix plus élevé des matériaux écologiques et de l'investissement dans certains équipements onéreux (comme les panneaux photovoltaïques). Ce surcoût varie en fonction du niveau d'ambition des dispositions d'éco-conception retenues et des besoins en maintenance. Il faut cependant prendre en considération la réduction des dépenses en énergie, obtenue grâce aux différentes mesures de sobriété et d'efficacité énergétique et à la production d'énergie renouvelable in situ. (Plan Bâtiment Durable, 2018)

### 2.5.4 Exemples et retours d'expérience



**Figures 2.9 et 2.10 Halte éco-durable de Niederbronn-les-Bains**  
(Systra, fiche éco-conception halte éco-durable, 2018)

Réalisée par la SNCF en avril 2008 en Alsace, la halte de Niederbronn-les-Bains est la première halte éco-durable de France. Pour assurer un chantier à faible nuisance, elle a été fabriquée en atelier puis montée sur place en seulement sept jours grâce à sa façade modulaire. La halte a été posée sur des plots en bétons pour limiter l'empreinte au sol et est accessible aux Personnes à Mobilité Réduite (PMR). La treille à feuillage caduque à l'ouest et le toit végétalisé assurent l'isolation thermique du bâtiment tout en favorisant la biodiversité sur le site. Pour optimiser la consommation l'énergie, des détecteurs de présence limitent l'utilisation de dispositifs lumineux, et un auvent photovoltaïque produit l'énergie nécessaire au

fonctionnement des équipements. Enfin, un parking à vélo encourage l'intermodalité des usagers. (SNCF Proximités, 2010)

## 2.6 Solution d'éco-conception n°5 : le supercondensateur

Un supercondensateur, tout comme une batterie, est un dispositif de stockage de l'énergie. Il se caractérise notamment par une très forte densité de puissance qui lui permet de se charger et de se décharger très rapidement. Complémentaire à la batterie, qui est utilisée pour stocker une quantité importante d'énergie, le supercondensateur, quant à lui, répond à des pics de puissance (Supercondensateur, 2016a). Il dispose également d'une durée de vie largement supérieure, puisqu'il peut faire l'objet de plus d'un million de cycles avant d'observer une baisse de ses performances. Le supercondensateur est une technologie récente qui tend à s'imposer pour les appareils électroniques, mais aussi et surtout pour le stockage des énergies renouvelables et les moyens de transport électriques. (Supercondensateur, s. d.)

Utilisé dans les projets d'infrastructures linéaires sur rail, un supercondensateur embarqué sur le toit des rames permet de récupérer l'énergie électrique produite par le freinage des rames et de la stocker. Ce procédé fournit suffisamment d'énergie à la rame pour parcourir plusieurs centaines de mètres. Ainsi, les supercondensateurs permettent de réaliser des économies d'énergie et de réduire le besoin en caténaires. (Gualous, Gallay et Berthon, 2004)

**Tableau 2.6 : Analyse multicritère du supercondensateur**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	Manque d'informations quant à la possibilité de recycler les supercondensateurs en fin de vie	-
Préservation des matières premières	Réduction de la consommation de matières premières, car moins de caténaires, mais nécessite l'utilisation de graphène, principalement produit à partir d'une ressource limitée	--
Préservation de la biodiversité	n/a	0
Paysage	La réduction des caténaires favorise l'intégration urbaine	++
Gestion des eaux	n/a	0
Emprises	Pas d'emprise supplémentaire	0
Entretien & durabilité	Très bonne durabilité (plus d'un million de cycle)	++
Coût global	Coût élevé, compensé en partie par la réduction de la consommation d'énergie	--
Conditions de réalisation	Adapté aux projets de transports électriques	0
Émissions de gaz à effet de serre	Réutilisation d'énergie électrique : pas d'émission de GES	++
Pollution atmosphérique	Pas d'émission de polluants	++
Énergie	Permet une économie d'énergie d'environ 30%	++

### **2.6.1 Avis technique**

La possibilité d'avoir recours à la récupération d'énergie dans les projets de mobilité, grâce aux supercondensateurs, a aujourd'hui été démontrée par plusieurs expérimentations réussies, telles que :

- Le bus électrique de l'aéroport de Nice, testé depuis 2014, qui assure une charge ultrarapide (Supercondensateur, 2016b) ;
- Le bus électrique de Ningbo, en Chine, mis en service en 2015 et dont la charge complète ne prend pas plus de 10 secondes (Supercondensateur, 2015) ;
- Le métro de Séoul, en Corée du Sud, réalise 20% d'économie d'énergie depuis 2013 grâce à la récupération d'énergie de freinage (Supercondensateur, 2014).

### **2.6.2 Avis environnemental**

Les supercondensateurs présentent d'une part l'intérêt de réduire la consommation énergétique des transports grâce à la réutilisation de l'énergie électrique créée par l'action mécanique du freinage des rames. Cette énergie propre n'émet pas de gaz à effet de serre ou de polluants, ni à la production ni à l'utilisation. (Gualous et al, 2004) De plus, la production d'énergie in situ permet de limiter les pertes en ligne liées à l'acheminement de l'énergie et de réduire l'utilisation de matières premières pour l'installation de caténaires sur la ligne.

En revanche, la fabrication des supercondensateurs nécessite d'avoir recours à du graphène, obtenu à partir du graphite, un minéral d'origine non renouvelable aux performances supérieures à celles du silicium. (Futura Sciences, s. d.) Difficile à produire, le graphite est surtout disponible en quantité limitée et tend déjà à être surexploité. Une piste d'amélioration du supercondensateur est l'utilisation de graphène obtenu à partir de bois de pin. En effet, une équipe de chercheurs de l'Université de Rice à Houston, aux Etats-Unis, ont réussi à transformer du bois en mousse de graphène en utilisant un laser dans des conditions atmosphériques spéciales (Science & Vie, 2017). Ce procédé, s'il est industrialisé, permettrait donc de produire des supercondensateur en graphène à partir d'une ressource renouvelable, illimitée et dont les impacts sur l'environnement sont limités lorsqu'elle est gérée durablement.

En ce qui concerne la fin de vie des supercondensateurs, le projet ENERGY CAPS financé par l'Union Européenne, visant à développer des supercondensateurs propres et écologiques pour le secteur des transports, a réussi à répondre « aux exigences de rendements minimaux de recyclage de 50% définies par la directive de l'UE relative aux piles et accumulateurs ». L'impact global du projet a été évalué par les partenaires du projet et a notamment validé son intérêt environnemental sur les phases de fabrication et de fin de vie. (Commission Européenne, 2016) De plus, plusieurs études en cours visent à perfectionner cette technologie et à étendre la durée de vie des supercondensateurs (Shili, Venet, Hijazi, Sari et Lin-Shi, 2016).

### **2.6.3 Avis économique**

Aujourd'hui, le prix d'un module de supercondensateurs est de 10 000 euros par kWh. En considérant qu'un tramway peut récupérer entre 2 et 3 kWh lors d'un arrêt, il est installé en moyenne un module par rame, ce qui revient à 20 000 euros/rame. (Supercondensateurs, 2016a) Ce coût, bien que compensé en partie sur le long terme par les économies réalisées par la récupération d'énergie de freinage, reste néanmoins très élevé et convient principalement aux lignes dont le trafic est régulier et important (métro par exemple).

### **2.6.4 Exemple et retour d'expérience**

Récompensée par le Programme Interministériel de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres (PREDIT), l'expérimentation du Système de Tramway à Efficacité Energétique Maximisée (STEEM) lancée en 2009 sur la ligne T3 à Paris avait permis d'équiper l'une des 21 rames de supercondensateurs embarqués dans un coffre sur le toit. L'énergie stockée a permis de compenser l'absence de caténaires entre les stations Porte d'Italie et Porte de Choisy, séparées d'environ 300 mètres. L'efficacité de cette solution a notamment été démontrée par une réduction moyenne de la consommation énergétique de 16%, sur la période d'expérimentation d'un an, par rapport à un système classique d'approvisionnement électrique. En outre, cela a permis une meilleure intégration urbaine du tramway (Web Trains, 2011)

## **2.7 Solution d'éco-conception n°6 : les quais solaires**

Inaugurée en 2016 après 5 années de recherches du constructeur Colas, un leader mondial de la construction des infrastructures de transport, et de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES), la première route solaire au monde a vu le jour en France. De l'association des savoir-faire de ces deux entités, expertes de la construction routière et de la production d'énergie renouvelable, a émergé cette véritable innovation. (Wattway by Colas, s. d.) Composée d'une multitude de couches successives contenant des cellules photovoltaïques, la « Wattway » peut être installée directement sur les chaussées existantes. Déployées sur un kilomètre de route départementale dans la commune de Tourouvre, dans l'Orne, les 2800m<sup>2</sup> de dalles photovoltaïques de la toute première route solaire ont permis de produire près de 150 MWh d'électricité en un an. Après une année d'expérimentation, le bilan est très positif pour ce qui est de la solidité de l'installation. (Sciences et Avenir, 2017)

Déclinées comme revêtement de quais de gares, dont la localisation géographique permet un ensoleillement suffisant et régulier (comme dans le sud de la France), les dalles photovoltaïques assurent une production d'énergie renouvelable pour alimenter la gare (éclairage, chauffage, climatisation) et ses équipements (panneaux d'affichage, bornes, maintenance ...).

En ce qui concerne la fin de vie des quais solaires, l'enjeu est similaire à toutes les technologies de production d'énergie photovoltaïque. Les évolutions technologiques et le développement de nouvelles

solutions, principalement induites par la pression réglementaire, ont permis d'atteindre un taux de 99% de composants recyclables dans les panneaux solaires. Dans la pratique, le photovoltaïque tend à être de mieux en mieux recyclé, notamment grâce à « la capacité des acteurs du recyclage à adapter [...] leur modèle économique et leur système administratif (de facturation et de traçabilité des déchets) aux besoins des partenaires et au cadre réglementaire local » (Aladjidi et Rolland, 2010 et Billard, Bazin et Lacroix, 2012). Néanmoins, le constructeur Colas ne communiquant pas sur la fin de vie de ses routes solaires, il est indispensable de s'en rapprocher afin de s'assurer de l'existence d'une filière de recyclage et, à défaut, de proposer un partenariat pour le développer les techniques d'élimination des dalles de route solaire en fin de vie.

**Tableau 2.7 : Analyse multicritère des quais solaires**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	Manque d'information sur la gestion des matériaux	na
Préservation des matières premières	Ressources fossiles nécessaires pour la conception des dalles photovoltaïque, mais énergie renouvelable	+
Préservation de la biodiversité	n/a	0
Paysage	De quelques millimètres d'épaisseur, les dalles solaires sont esthétiques et ont l'apparence de pavés	++
Gestion des eaux	n/a	0
Emprises	Installation de production d'énergie renouvelable qui n'empiète pas sur le foncier	++
Entretien & durabilité	Peu d'entretien et matériaux robuste, mais manque de recul sur la durabilité de la solution	+
Coût global	Économies en exploitation, mais coût d'installation élevé	-
Conditions de réalisation	Ne nécessite pas de déconstruction, peut-être posé sur les chaussées existantes	++
Émissions de gaz à effet de serre	Production d'énergie solaire : aucune émission de GES	++
Pollution atmosphérique	Pas d'émissions de polluants à l'exploitation	0
Énergie	Énergie renouvelable	++

### 2.7.1 Avis technique

Les technologies solaires de production énergétique tendent de plus en plus à s'améliorer et à se démocratiser. D'un point de vue technique et réglementaire, il n'existe pas de barrière à l'installation de panneaux photovoltaïques comme revêtement des quais de gare, bien que cette technologie soit encore trop récente pour en certifier la durabilité. De plus, il convient de réaliser une étude en amont du projet pour évaluer les besoins en énergie du projet et ainsi adapter la surface de panneaux nécessaire pour y répondre. (Ademe, 2017b)

### 2.7.2 Avis environnemental

Le revêtement solaire de Colas permet, à travers la production d'une énergie propre et renouvelable, de répondre à des enjeux de raréfaction des ressources fossiles et aux problématiques de changements climatiques. Cette solution présente les mêmes intérêts environnementaux que toutes les solutions liées aux technologies solaires, l'une des énergies les plus écologiques existantes (Ademe, 2013) : production d'une énergie écologique, autonomie et économie énergétiques, etc. Elle convient notamment aux projets pour lesquels il n'est pas possible d'installer des panneaux classiques en toiture de bâtiments. En outre, il s'agit d'une excellente vitrine pour le maître d'ouvrage, qui pourra communiquer sur son engagement environnemental et sa capacité à anticiper les nouvelles technologies pour des bâtiments à énergie positive.

### 2.7.3 Avis économique

Bien que coûteux à l'installation (notamment en raison du caractère encore expérimental de cette technologie), le revêtement solaire permet un retour sur investissement à moyen terme grâce des à économies d'énergie considérables en phase d'exploitation de la gare. Une étude doit être réalisée pour déterminer la surface optimale à installer pour assurer l'autoconsommation de la halte et le délai de retour sur investissement afin d'évaluer l'intérêt économique de la solution (Ademe, 2017b).

### 2.7.4 Exemple et retour d'expérience

La première expérience de route solaire en milieu ferroviaire, menée de concert par le constructeur Colas et la SNCF, est actuellement en cours à la gare de Grasse, dans les Alpes Maritimes. Profitant des travaux de modernisation de la ligne reliant Grasse à Cannes, des dalles photovoltaïques ont été installées sur près de deux cents mètres et sur toute la largeur du quai, afin de les tester pour la première fois en « situation réelle » comme revêtement de quai. Cette expérimentation qui s'étendra sur les trois prochaines années, de 2018 à 2021, a pour objectif d'observer la durabilité (résistance des batteries, résistance à l'usure, aux piétinements et aux dégradations telles que les chewing-gums ...) et la performance (adhérence en cas de d'intempéries) de cette innovation. (Soli et al., 2018). En revanche, l'installation venant tout juste d'être mis en œuvre, les données de rendements énergétiques ne sont pas encore disponibles.



**Figure 2.11 Revêtement solaire sur les quais de la gare de Grasse (Nice Matin, 2017)**



## 2.8 Solution d'éco-conception n°7 : la culture de micro-algues en façade de bâtiments

Depuis 2008, l'agence d'architecture XTU, le laboratoire GEPEA et le groupe industriel Séché se sont associés pour développer un projet de « biofaçade ». Cette solution biomimétique, qui « s'inspire des solutions existant dans la nature pour répondre à des besoins humains », consiste à cultiver des micro-algues directement à la surface des murs grâce à des photobioréacteurs. (ConsoGlobe, 2016)

La biofaçade permet, d'une part, de réduire l'énergie consommée par le bâtiment en améliorant son isolation thermique et d'agir comme une serre en accumulant l'énergie des rayonnements du soleil. De plus, l'installation fonctionne comme un panneau solaire : l'énergie captée peut également être réutilisée pour alimenter le bâtiment. Selon le coordinateur du projet, il est possible d'observer un gain allant jusqu'à 50% de la consommation énergétique. D'autre part, les micro-algues absorbent les émissions de CO<sub>2</sub> du bâtiment pour se nourrir (leur consommation est « trois à cinq fois supérieure à une forêt en pleine croissance »). La récolte des micro-algues permet ensuite de les utiliser comme biocarburant (bien que l'opération soit peu favorable économiquement en cas de culture sur des surfaces limitées) ou pour la fabrication de cosmétiques. (ConsoGlobe, 2016)

En parallèle de ce projet, la société Ennesys travaille également au développement de cultures de micro-algues grâce à des panneaux transparents à intégrer directement en façade des bâtiments. En plus de jouer un rôle de bouclier thermique pour offrir une isolation à l'immeuble, ils représentent une véritable solution d'écologie industrielle à travers le bouclage des flux. (Ennesys, s. d.b)

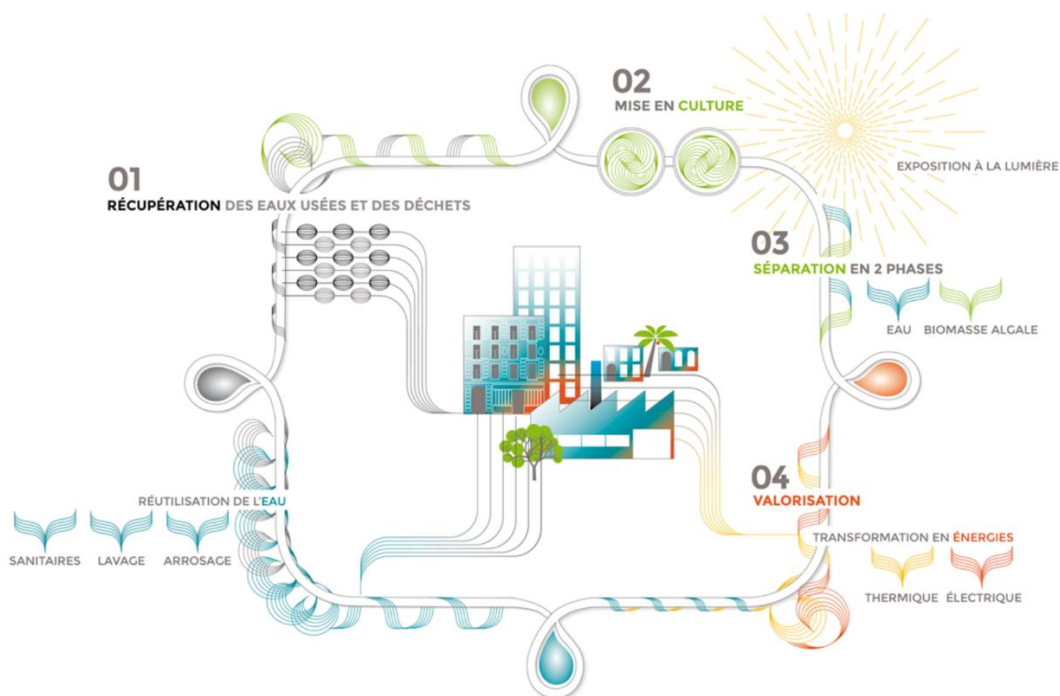


Figure 2.12 Les quatre étapes du système de façades à micro-algues d'Ennesys (Ennesys, s. d.b)



Dans ces « photoréacteurs », des aquariums en plastique remplis d'un liquide de couleur verte, circule hermétiquement un mélange de déchets (eaux usées et déchets organiques), que vont dévorer des micro-algues en se reproduisant à grande vitesse par photosynthèse sous l'effet de la lumière. Grâce à ce système, le CO<sub>2</sub> produit par l'immeuble est absorbé et les déchets sont dégradés par les bactéries, et permet d'obtenir en sortie une eau épurée à 99,9% pouvant être réutilisée pour irriguer les chasses d'eau, et une biomasse solide qui peut être soit brûlée dans une chaudière, soit être purifiée en huile pour la production de biodiesel. (Ennessys, s. d.b)

**Tableau 2.8 : Analyse multicritère de la culture de micro-algues en façade de bâtiments**

Thématique environnementale	Justification	Note
Gestion des matériaux	Valorisation des déchets	++
Préservation des matières premières	Production de carburant qui ne nécessite pas d'extraction de matière première et épuration des eaux usées	++
Préservation de la biodiversité	n/a	0
Paysage	Aspect « futuriste » adapté aux environnements architecturaux très modernes, mais intégration paysagère plus difficile sur des bâtiments traditionnels	-
Gestion des eaux	Purification des eaux usées et réutilisation sur site	++
Emprises	Intégration sur la façade : pas d'emprise au sol	++
Entretien & durabilité	Nécessite l'intervention d'un algoculteur pour une récolte quasi quotidienne, pas de recul sur la durabilité de l'installation	--
Coût global	Coût de l'installation : 2000 à 3000 euros par mètre carré, rentabilisé par les économies d'eau et d'énergie, et la possibilité de revendre le biocarburant	+/-
Conditions de réalisation	Duopole d'Ennessys et Séché	0
Émissions de gaz à effet de serre	Absorption du CO <sub>2</sub> par les micro-algues	++
Pollution atmosphérique	Pas d'émissions de polluants	0
Énergie	Rôle de bouclier thermique pour réduire la conso d'énergie et valorisation énergétique des déchets en biocarburant	++

### 2.8.1 Avis technique

Encore à l'état expérimental, ces deux projets de biofaçades ont, entre autres, obtenu le soutien de l'État, de l'INRA, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Bien que le recul ne soit pas suffisant pour juger de l'efficacité et de la durabilité de cette solution, elle est cependant très prometteuse. Une expérimentation en collaboration avec Ennessys ou le groupe Séché sur un projet de gare ferroviaire ou de site de maintenance et de remisage permettrait d'en démontrer la faisabilité technique. De plus, la « FreeWaterBox », version mobile du système d'épuration des eaux usées d'Ennessys, est particulièrement

recommandée sur les bases vie temporaires (tels que les chantiers de construction) pour répondre à un besoin de purification de l'eau dans un contexte particulièrement contraint. Autonome, cette boîte transportable produit elle-même l'énergie dont elle a besoin pour fonctionner. (Ennesys, s. d.a)

### **2.8.2 Avis environnemental**

Conforme aux réglementations thermiques et de gestion des déchets en vigueur, ce système de « biofaçade » est particulièrement pertinent pour réduire la consommation énergétique du bâtiment (grâce à l'isolation thermique et la production de biocarburant) et le besoin en énergie fossile, tout en préservant la ressource en eau. Il participe à développer une plus grande autonomie en eau et en énergie, et à réduire la proportion de déchets ultimes. Enfin, ces panneaux transparents directement intégrés sur l'immeuble préservent l'espace foncier et ne nécessitent pas d'emprise supplémentaire pour le projet. (Ennesys, s. d.a)

Bien qu'elle n'ait encore jamais été testée dans le secteur ferroviaire, cette solution présente de nombreux intérêts et semble transposable sur un projet de gare. En effet, ce type de bâtiment permet de mettre en œuvre une surface importante de culture de micro-algues et ainsi d'en récolter une quantité suffisante pour être transformée en biocarburant, convertible en énergie électrique ou thermique, afin d'alimenter les équipements de la gare et d'assurer la climatisation et le chauffage des espaces intérieurs. De plus, ce système permet de réduire les déchets produits par les usagers et de purifier les eaux usées, qui peuvent ensuite être réutilisées en circuit fermé pour approvisionner les chasses d'eau des toilettes de la gare. Cette installation serait également très pertinente dans les sites de maintenance et remisage, qui utilisent une grande quantité d'eau potable pour le nettoyage des trains. L'épuration des eaux usées par les micro-algues permettrait d'utiliser plusieurs fois la même eau, induisant ainsi une baisse significative de la consommation.

### **2.8.3 Avis économique**

Sur le projet pilote « SymBIO<sub>2</sub> » mené par l'agence d'architecture XTU, le laboratoire GEPEA et le groupe industriel Séché, le coût de la biofaçade revenant à 3000 euros par mètre carré, bien que le prix cible pour la commercialisation de cette innovation soit de 2000 euros par mètre carré. Il est également recommandé d'investir dans un local technique pouvant coûter de 50 à 500 000 euros en fonction de la taille de la façade. Cependant, ce poste de dépense peut être pris en charge par l'exploitant. Le loyer versé par cet algoculteur permet, d'après un communiqué de presse de 2015 des trois porteurs de projet, de rentabiliser l'installation en quinze années environ. (XTU Architects, 2015)

Il n'existe pas de frein réglementaire à utiliser une biofaçade pour le traitement de l'eau et des déchets, cependant le manque de recul sur ce système de culture des micro-algues empêche aujourd'hui de statuer sur sa pérennité. Un projet pilote sur un établissement ferroviaire, mené avec l'une des entreprises développant ce procédé, permettrait néanmoins de tester la pertinence de cette solution et de mettre en valeur la capacité à anticiper les évolutions technologiques du maître d'ouvrage.

#### 2.8.4 Exemple et retour d'expérience

En février 2016, le projet In Vivo a été annoncé comme lauréat du concours « Réinventer Paris ». Celui-ci consiste à concevoir un groupe d'immeubles innovants, tant du point de vue architectural qu'environnemental, dans le 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris. L'objectif du projet est de répondre aux enjeux actuels en « [favorisant] la mixité et l'ouverture entre citoyens, et [en intégrant] le vivant en ville, au service d'une société plus juste, durable et résiliente » (Actu Archi, 2016). In Vivo comprendra notamment une « Algo House » développée par le consortium SymBIO<sub>2</sub> : sur les murs extérieurs d'une résidence étudiante de 141 logements sera intégrée une biofaçade dans laquelle seront cultivées des micro-algues. Celle-ci participera à l'amélioration des performances du bâtiment (réduction des dépenses énergétiques grâce à la « valorisation de la chaleur captée par la biofaçade pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage ») (CDC Habitat, 2016), permettant ainsi d'atteindre une consommation énergétique inférieure au seuil de 48kWh/m<sup>2</sup> par an fixé par le Plan Climat de Paris. La production de biomasse algale, quant à elle, sera utilisée dans un « programme de recherche en gestation sur les actifs issus des micro-algues pour les futurs médicaments biosourcés » des Universités parisiennes de sciences de la vie (5, 6 et 7<sup>ème</sup> arrondissement) et de l'Université de Varsovie, piloté par l'Université de Nantes. (Actu Archi, 2016)



**Figure 2.13 Les bâtiments du projet In Vivo à Paris (CDC Habitat, 2016)**

Pour conclure, il existe une diversité de solutions d'éco-conception pour réduire les impacts des bâtiments et des infrastructures ferroviaires. Compte tenu des contraintes de l'essai, le choix a été fait de présenter ici seulement un échantillon des technologies, procédés et alternatives qui permettent d'intégrer l'environnement dans la conception. L'outil d'aide à la décision en éco-conception dans les projets de mobilité, dont la méthodologie est détaillée dans la partie suivante, intègre quant à lui des centaines de solutions de développement durable et vise à être perpétuellement alimenté.

## 2.9 Synthèse des solutions

Les différentes solutions dites « d'éco-conception » (définies ainsi pour leur capacité à intégrer une ou plusieurs considérations environnementales dans la conception et à répondre aux problématiques posées par la technique de conception de référence) présentées dans cette deuxième partie sont synthétisées dans le tableau suivant.

**Tableau 2.9 : Synthèse des solutions d'éco-conception**

		Gestion des matériaux	Matières premières	Biodiversité	Paysage	Gestion des eaux	Emprises	Entretien & durabilité	Coût global	Conditions de réalisation	Emissions de GES	Pollution atmosphérique	Energie
Solution EC n°1	Béton vert	++	++	0	+	0	0	0	+	--	++	+	++
Solution EC n°2	Murs en gabion	+	++	+	+	0	-	+	--	++	++	0	++
Solution EC n°3	Végétalisation des plateformes tramway	0	++	++	++	--	+	--	+/-	+	++	+	++
Solution EC n°4	Halte éco-durable	++	++	+	+	+	+	--	--	-	++	++	++
Solution EC n°5	Supercondensateurs	-	++	0	++	0	0	++	--	0	++	++	++
Solution EC n°6	Quais solaires	na	+	0	++	0	++	+	-	++	++	0	++
Solution EC n°7	Micro-algues en façade de bâtiments	++	++	0	-	++	++	--	+/-	0	++	0	++

Ce tableau permet de comparer les solutions entre elles en fonction de leurs scores dans les différentes catégories d'enjeu, et ainsi de prioriser les actions à mettre en œuvre selon l'orientation que l'on souhaite donner au projet. Par exemple, si la sensibilité du décideur est de réduire les émissions de gaz à effet de serre de son projet sans en augmenter le coût global, alors l'utilisation de béton vert apparaît comme une solution pertinente. En revanche, si son objectif principal est de mettre en avant son engagement de protection de la biodiversité et de favoriser l'intégration paysagère de son projet, alors la végétalisation des plateformes sera à privilégier.

Pour rappel, ces solutions ne sont qu'un infime échantillon des différentes techniques d'éco-conception existantes et, pour les besoins de l'essai, elles ont été sélectionnées pour leur caractère transversal (puisque'elles couvrent les bâtiments, les constructions d'infrastructures, les équipements et répondent aux principaux enjeux du ferroviaire, c'est-à-dire la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre de la construction des infrastructures et la préservation des matières premières).

Dans une démarche d'éco-conception, il est important de réaliser une comparaison des différentes solutions d'éco-conception, entre elles et avec la solution de référence pour en déterminer l'intérêt environnemental. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur un tableau (comme présenté par le tableau 2.8) ou d'outils comme la matrice de Pugh par exemple. Celle-ci est une méthode matricielle développée par l'ingénieur du même nom qui permet l'évaluation de différentes alternatives, dans le but de « converger vers une seule solution » (Kojmane et Aboutajeddine, 2015).

Pour faciliter l'intégration de l'éco-conception au sein des projets de Systra, une méthodologie pour la création d'un outil d'aide à la décision a été développée afin de générer des propositions de conception dans un premier temps, mais également de simplifier la comparaison des solutions et accompagner l'utilisateur dans son choix final. Dans un premier temps, les solutions seront présentées sous forme de diagramme araignées pour permettre à l'utilisateur d'avoir une présentation visuelle des forces et faiblesses des différentes solutions qui s'offrent à lui sur son projet. A terme, l'objectif sera de développer une méthode qui permettrait de prioriser les enjeux (à l'aide d'une pondération comme pour la méthode de Pugh, par exemple) afin de hiérarchiser les réponses de l'outil en fonction des affinités de l'utilisateur.

### **3. CRÉATION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION EN ÉCO-CONCEPTION**

Comme cela a été démontré dans une première partie, le secteur des infrastructures linéaires sur rail n'est pas sans présenter de nombreux impacts environnementaux, et leur réduction est un enjeu de plus en plus considéré par les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Pour y répondre, de nombreuses solutions existent, dont un échantillon a été présenté dans la deuxième partie. Afin de faciliter l'intégration de l'éco-conception dans les projets de mobilité de Systra, une méthodologie pour la création d'un outil d'aide à la décision a été élaborée au cours d'un stage-intervention, au sein du département d'Ingénierie Environnementale et Durable (IED). Ce dernier chapitre expose les objectifs poursuivis par la création d'un tel outil et la méthodologie à appliquer pour sa mise en œuvre, puis présente l'outil en son état d'avancement et suggère de futures améliorations à apporter.

#### **3.1 Objectifs de l'outil**

La volonté de prendre en compte les considérations environnementales dans la conception tend à être de plus en plus présente dans les projets de mobilité (Champagne et Negron-Poblete, 2012). L'intégration de l'éco-conception est souvent impulsée par le client, qui souhaite ainsi maîtriser ses coûts et valoriser sa démarche en exposant ses engagements en matière de responsabilité sociétale (Pôle éco-conception et Institut de développement de produits, 2014), à l'heure où la réduction des pollutions générées par les entreprises est devenue un réel argument de communication. Les chefs de projet, en charge de la conception, perçoivent l'éco-conception comme une opportunité d'innovation et expriment un intérêt croissant pour la mise en œuvre de techniques novatrices et l'usage de matériaux alternatifs (Vallet, 2012). Enfin, la Direction de Systra affiche clairement l'orientation du groupe vers une image de conception verte, notamment à travers la définition d'objectifs de développement durable et une communication (tant en interne qu'en externe) axée sur la performance environnementale des projets auxquels le bureau d'études prend part, comme on peut le lire sur son site internet « L'efficience environnementale au centre des projets de Systra » (Systra, 2016).

Malgré l'enthousiasme de l'ensemble des parties prenantes à aller vers des démarches durables, en pratique l'éco-conception peine encore à être systématiquement intégrée aux projets, et consiste principalement à répondre aux demandes expresses stipulées au cahier des charges, qui trouvent la plupart du temps leur origine dans les contraintes normatives et réglementaires, la pression des consommateurs ou encore les opportunités du marché (Vallet, 2012).

Cet outil d'aide à la décision vise à faciliter l'éco-conception des projets de mobilité menés par Systra, notamment en faisant la promotion de l'éco-conception et des ressources disponibles en interne pour un accompagnement à la démarche, tout en prenant en compte les besoins et les contraintes des chefs de projet en vue de leur simplifier la compréhension et l'intégration de solutions. Enfin, cet outil a vocation à rassembler les différents retours d'expérience du groupe pour les capitaliser sur les projets futurs.

### **3.1.1 Répondre au besoin des chefs de projets**

Souvent peu formés aux enjeux de développement durable, les chefs de projet se retrouvent aujourd'hui de plus en plus confrontés à la demande de leurs clients d'intégrer une démarche d'éco-conception dans les projets de mobilité, et plus particulièrement dans la conception des infrastructures linéaires de transport sur rail. La SNCF par exemple, l'un des clients majeurs de Systra, mène depuis 2013 une politique d'économie circulaire et affiche dans son Rapport Engagement Sociétal de l'Entreprise de 2017 sa stratégie de « développement de la démarche d'éco-conception des produits, des systèmes et des projets » pour la période 2017-2020, en vue de limiter l'empreinte environnementale de ses activités (SNCF, 2017).

Contraints par les délais et les budgets alloués à leurs projets, les chefs de projet n'ont pas toujours la possibilité d'avoir recours aux services du responsable éco-conception, lui-même déjà sollicité sur de nombreuses missions. Cependant, la mise à disposition d'un outil d'aide à la décision, à l'intention des responsables techniques, répertoriant les alternatives de matériaux et de procédés pouvant être mis en œuvre sur leurs projets permet de faciliter l'application de solutions d'éco-conception en autonomie. Ainsi, cela permet de tendre vers une intégration systématique des solutions d'éco-conception dans les projets, et ce, même lorsqu'il n'existe pas de budget spécifiquement alloué à l'intervention d'un responsable éco-conception. Celui-ci peut alors se consacrer aux projets les plus ambitieux qui nécessitent d'entreprendre une démarche d'éco-conception plus approfondie.

Cet outil d'aide à la décision en éco-conception est donc conçu de manière à pouvoir être utilisé de manière autonome par un chef de projet, son utilisateur principal, et dans le but de lui faciliter la visualisation des solutions d'éco-conception à envisager en fonction des caractéristiques de son projet.

### **3.1.2 Outil de retour d'expérience sur les initiatives d'éco-conception mises en place par Systra**

Outre la réponse au besoin des chefs de projet, l'autre motivation du département IED pour la conception d'un outil d'aide à la décision en éco-conception est de faire valoir leur retour d'expérience sur les initiatives mises en œuvre sur leurs projets antérieurs. En effet, la problématique actuelle du département est la difficulté à valoriser les matériaux produits en interne (tels que les guides d'éco-conception ou les benchmarks) et l'expérience acquise à travers les différentes missions de conseil. Ainsi, la conception d'un outil pouvant faire le lien entre ces différents contenus permettra de gagner en efficacité et d'optimiser la recherche de solutions.

De plus, cet outil tient son intérêt dans sa capacité à proposer à son utilisateur un large choix de solutions d'éco-conception, à la fois en adéquation avec le projet visé par la démarche et à jour des évolutions des procédés, matériaux et innovations. Ainsi, l'outil d'aide à la décision développé par Systra est également un moyen efficace d'assurer une veille technologique et de la valoriser à travers un outil fonctionnel. Véritable outil collaboratif, il permet à tous les acteurs de l'éco-conception de l'entreprise de contribuer à étoffer ses données d'entrée.

### **3.1.3 Promouvoir l'éco-conception au sein du bureau d'études**

L'objectif secondaire du département Ingénierie Environnementale et Durable, à travers la conception d'un outil à destination des chefs de projet de Systra France, est de faire la promotion des ressources disponibles en interne auprès des différents services. En effet, en raison de la multiplicité des expertises au sein du bureau d'études, certains chefs de projet peuvent ignorer qu'une (ou plusieurs) personne ressource travaillant sur les questions d'éco-conception est apte à les accompagner pour améliorer la performance environnementale de leurs projets. Ainsi, le but d'IED est d'utiliser la diffusion de l'outil d'aide à la décision pour mettre en valeur leur expertise en éco-conception et, plus largement, promouvoir le département.

Finalement, l'objectif sera atteint si, à terme, les considérations environnementales deviennent systématiquement intégrées (de façon mesurable) dans les projets d'infrastructures linéaires sur rail, voire sur l'ensemble des projets du groupe, tous secteurs confondus. En développant l'activité éco-conception, tant par la mise en œuvre de solutions techniques grâce à l'outil que par l'augmentation des sollicitations d'experts en éco-conception pour intervention sur projet, cela permettrait d'amener de réels changements opérationnels au sein de Systra et de tendre vers une approche plus systémique de l'intégration de l'environnement dans la conception. Pour aller plus loin et favoriser le partage des connaissances et des savoir-faire, des sessions régulières de créativité et d'éco-innovation pourraient être organisées avec les chefs de projets et les responsables métiers.

Une étude de 2014 menée par le Pôle éco-conception (français) et l'Institut de développement de produits (québécois) a identifié un certain nombre d'externalités positives générées par le développement de l'éco-conception dans l'entreprise. En externe, afficher son expertise en matière d'éco-conception permet de valoriser l'image de l'entreprise et d'entretenir de meilleures relations avec ses clients. En interne, l'éco-conception permet d'anticiper les nouvelles réglementations, dans une optique de durcissement des contraintes environnementales, d'augmenter sa capacité à produire de nouvelles idées et enfin, d'augmenter la motivation et la fierté des employés. En outre, la promotion de l'éco-conception et son intégration dans les projets permettent d'obtenir un avantage concurrentiel sur les bureaux d'études concurrents. (Pôle éco-conception et Institut de développement de produits, 2014)

### **3.2 Méthodologie de l'outil**

Le projet de réalisation d'un outil d'aide à la décision en éco-conception adapté aux missions de Systra a émergé en 2017 au sein du département IED et était mené initialement par les ingénieurs éco-conception de l'époque, Olivier Cottet et Maxime Baumann, en charge du contenu et par une équipe de développeurs du département Innovation pour la mise en forme d'un outil fonctionnel.

L'objectif du stage-intervention a été de reprendre la conception de l'outil à la suite des départs successifs des deux experts éco-conception. À ce stade, seule la plateforme en ligne Écothèque avait été créée et alimentée de quelques solutions d'éco-conception. La première mission a alors été d'étoffer l'Écothèque en

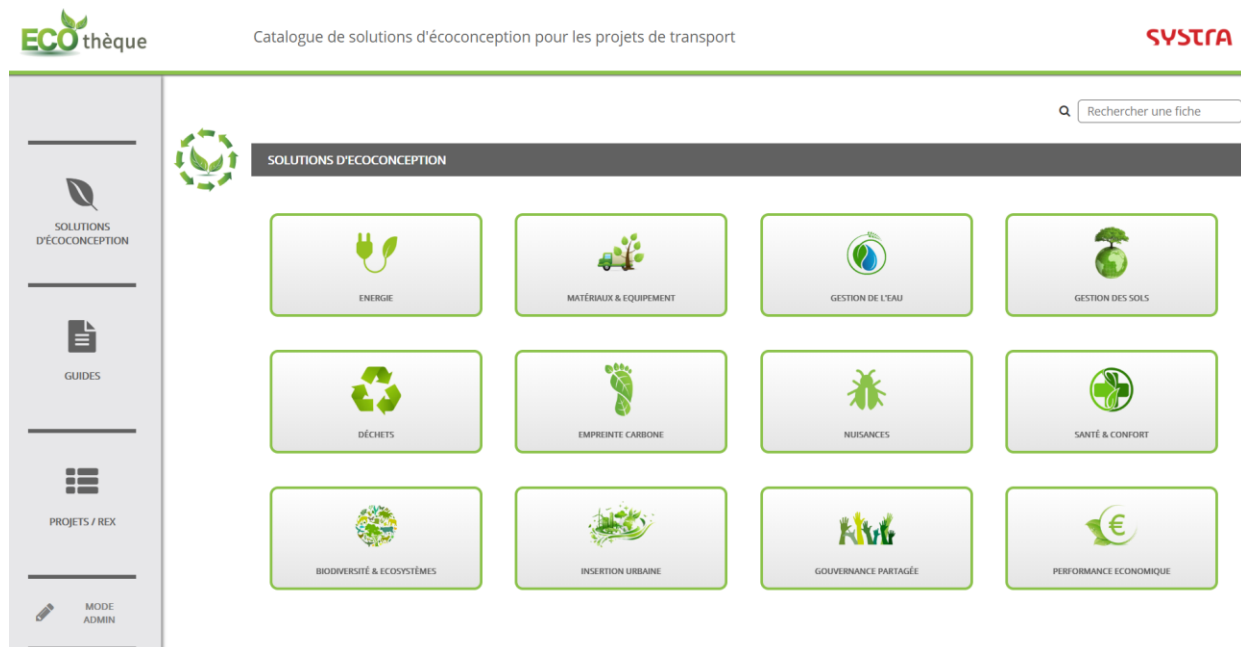


ajoutant des fiches solutions d'éco-conception, à partir des différents documents (guides, benchmarks et retours d'expérience) disponibles en interne et d'informations issues de recherches complémentaires. Une méthodologie a ensuite été élaborée en concertation avec le département Innovation : il s'agissait dans un premier temps d'identifier les différents éléments constituant les projets de bâtiments et d'infrastructures de transport sur rail et pouvant faire l'objet de solutions techniques d'éco-conception et de déterminer les critères inhérents au projet (comme la situation géographique et le climat, les contraintes de temps et de budget, etc.). Dans un second temps, une matrice devra être développée pour permettre de croiser les données du projet avec les solutions présentes sur l'Écothèque et ainsi émettre des propositions d'éco-conception cohérentes et adaptées aux différents paramètres du projet pour lequel on souhaite réduire les impacts environnementaux dès la conception.

Les sections suivantes détaillent la méthodologie appliquée pour la conception d'un outil d'aide à la décision en éco-conception, présentent l'état d'avancement de l'outil et le chapitre se conclue par une analyse critique et une proposition de pistes d'améliorations.

### 3.2.1 Création d'une base de données interne : l'Écothèque

La première étape du projet d'outil d'aide à la décision a été la création d'une plateforme en ligne, uniquement accessible par le réseau interne de l'entreprise, regroupant les solutions d'éco-conception. Celle-ci permet de compiler et de classer au sein d'un catalogue interactif les différentes techniques, procédés, matériaux et technologies permettant de réduire les impacts environnementaux des projets de transport sur rail.

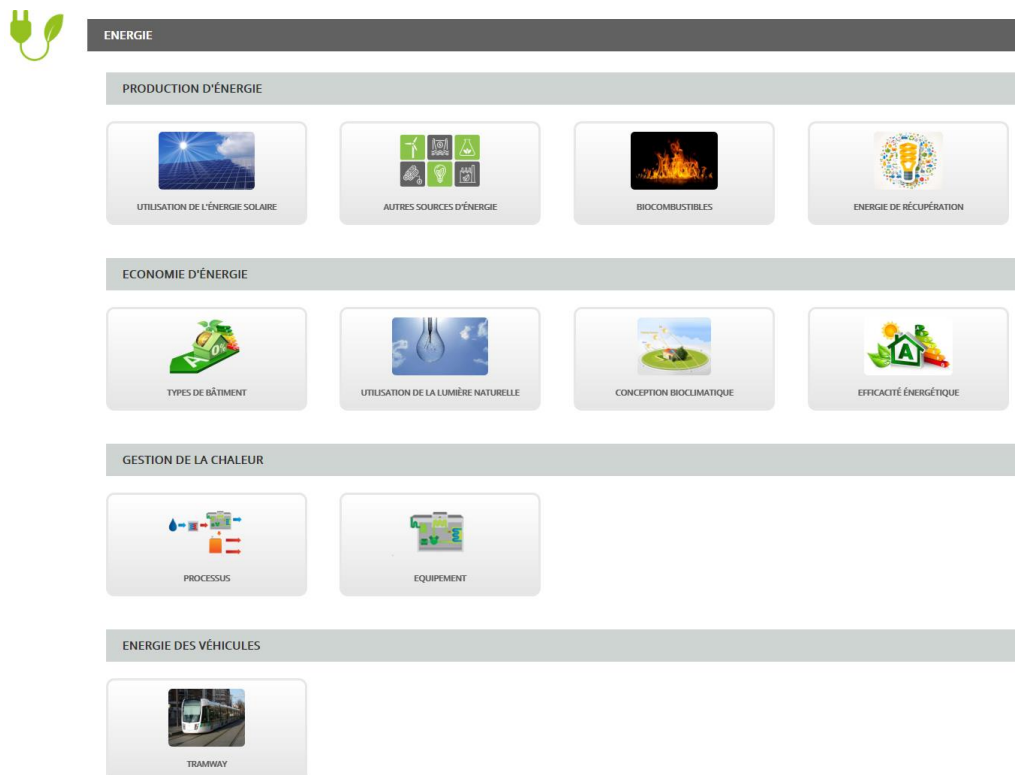


**Figure 3.1** Page d'accueil de l'Écothèque (Systra, Écothèque, s. d.)

Dans un premier temps, une classification générale a permis de trier les différentes fiches en fonction de leur enjeu principal de développement durable : l'énergie, les matériaux et équipements, la gestion de l'eau, la gestion des sols, les déchets, l'empreinte carbone, les nuisances, la santé et le confort des usagers, la préservation de la biodiversité et des écosystèmes, l'insertion urbaine, la gouvernance partagée et enfin, la performance économique.

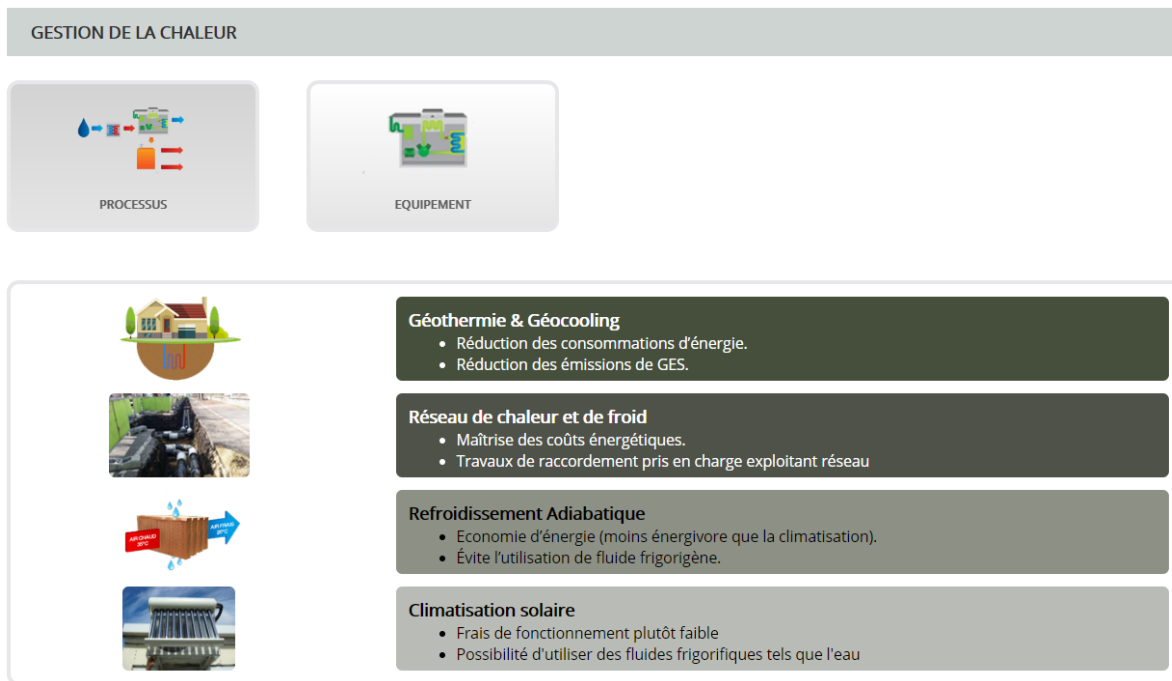
La plateforme a ensuite été alimentée en solutions d'éco-conception à partir des différents documents d'éco-conception de Systra : guides, benchmark, retours d'expérience, etc. L'objectif était d'effectuer une transition depuis un fonctionnement par documents numériques, qui présentent l'inconvénient de devenir rapidement obsolète, vers l'usage d'un outil collaboratif, modulable en fonction des besoins (grâce à un développement en interne) et surtout, évolutif. Les utilisateurs possédant le statut d'administrateur de l'outil peuvent ainsi ajouter et modifier des solutions d'éco-conception. L'Écothèque compte ainsi actuellement une centaine de fiches et vise à être régulièrement complétée et mise à jour.

Afin d'ordonner efficacement les fiches, les différentes thématiques de développement durable ont été divisées en plusieurs catégories. Sur la thématique de l'énergie par exemple, les différentes catégories sont la production d'énergie, l'économie d'énergie, la gestion de la chaleur et l'énergie des véhicules. En fonction des solutions qu'il souhaite ajouter, l'administrateur peut également créer de nouvelles catégories pour obtenir le classement qui lui semble être le plus pertinent.



**Figure 3.2 Onglet « Énergie »** (Systra, Écothèque, s. d.)

Enfin, chaque catégorie comprend un certain nombre de sous-catégories qu'il est possible d'ajouter, de supprimer et de modifier facilement, permettant de préciser le classement des solutions. Ainsi, les solutions d'éco-conception de la catégorie « gestion de la chaleur » ont par exemple été divisées en fonction qu'il s'agisse plutôt d'un processus ou d'un équipement.



**Figure 3.3 Onglet « Processus » (Systra, Écothèque, s. d.)**

En ce qui concerne les fiches éco-conception en tant que telles, elles comprennent un chapeau résumant la solution, une section renseignant les conditions particulières de mise en œuvre (par exemple, une situation géographique et un contexte météorologique, un type de bâtiment ou d'infrastructure, des caractéristiques spécifiques du projet, etc.), puis une description détaillée de la solution. Celle-ci doit être concise et apporter les éléments pertinents pour la compréhension de la solution, mais n'a pas vocation à être complète et exhaustive. En effet, les fiches de l'Écothèque doivent présenter les solutions pour proposer à l'utilisateur un tour d'horizon des alternatives de conception existantes et les informations apportées doivent être suffisantes pour lui permettre une prise de décision. Cependant, elles devront nécessairement être approfondies pour être appliquées sur un cas concret de bâtiment ou d'infrastructure dans un projet de transport sur rail. Pour faciliter cet approfondissement, des documents techniques ou des exemples de retours d'expérience peuvent être liés à la fiche et les diverses normes, lois ou règlements qui régissent la solution (s'il y en a) doivent être renseignés. Enfin, la solution est résumée en termes d'avantages et d'inconvénients, tant sur le plan environnemental que social, économique ou technique. Cette catégorie est d'autant plus importante qu'elle sera déterminante dans le choix des solutions par l'utilisateur, en fonction de ses sensibilités et des objectifs de réduction des impacts environnementaux de son projet.

Géothermie & Géocooling

RESUME

La géothermie est une méthode de captage de la chaleur du sol qui augmente de 3,3°C tous les 100 mètres.

Le géocooling consiste à assurer le rafraîchissement du bâtiment par géothermie. Le froid du sous-sol est utilisé directement sans pompe à chaleur.

CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

Aucune condition spécifiée

DESCRIPTION DETAILLEE

La géothermie est une méthode de captage de la chaleur du sol qui augmente de 3,3°C tous les 100 mètres.

Le transport de la chaleur se fait par un fluide caloporteur (eau ou eau glycolée). Les caractéristiques du sol conditionnent le rendement de l'installation.

3 techniques de géothermie sont disponibles sur le marché :

- La géothermie profonde (2000-5000 m ; > 150°C), pour l'alimentation des centrales électriques ;
- La géothermie basse énergie (300-2000 m, 30-150°C), pour l'alimentation de réseaux de chaleur ;
- La géothermie très basse énergie (0-300 m, 0-30°C), associée à une pompe à chaleur (habitat individuel, gare et bâtiment).

La géothermie dans les parois actives est une géothermie très basse énergie.

3 technologies : capteurs horizontaux, capteurs verticaux et prélèvements sur nappe phréatique ou d'une rivière.

L'étude de l'approvisionnement en énergie de bâtiment prescrite au CCH doit présenter la solution de la géothermie.

Le géocooling consiste à assurer le rafraîchissement du bâtiment par géothermie. Le froid du sous-sol est utilisé directement sans pompe à chaleur.

NORMES

- Décret n° 2011-544 du 18 mai 2011 relatif aux attestations de prise en compte de la réglementation thermique et de réalisation d'une étude de faisabilité relative aux approvisionnements en énergie pour les bâtiments neufs ou les parties nouvelles de bâtiments.

+

AVANTAGES

- Réduction des consommations d'énergie.
- Réduction des émissions de GES.
- Energie renouvelable
- Réduction des coûts d'exploitation.

-

INCONVENIENTS

- Forages (contraintes réglementaires).
- Faisabilité technique.

DOCUMENTS

PROJETS/REX

Projet Liaison ferroviaire CEVA (Cornavin / Eaux Vives / Annemasse), Genève

**Figure 3.4 Fiche solution d'éco-conception « Géothermie et Géocooling »** (Systra, Écothèque, s. d.)

Ainsi, l'Écothèque constitue la première partie de l'outil d'aide à la décision que souhaite développer Systra. Il s'agit d'une base de données de pistes d'éco-conception fonctionnelle en l'état, qui regroupe sur une même plateforme de nombreuses alternatives de conception pour intégrer l'environnement dans les projets de mobilité et répond au besoin de centraliser les solutions issues des différents guides et documents produits en interne, des retours d'expérience, du benchmark et de la veille technologique. Cependant sa capacité à faciliter les choix du décideur est assez limitée, notamment lorsque celui-ci ne possède pas de connaissances particulières en matière de développement durable. De plus, le classement des fiches par thématiques d'enjeux environnementaux ne permet pas à l'utilisateur de sélectionner les fiches en fonction du type de projet qu'il souhaite réaliser (bâtiment ou infrastructure) ainsi que ses composantes (création de nouvelles voies ferroviaires, construction de quais ...).

### 3.2.2 Déterminer les différentes composantes d'un projet de mobilité sur rail

Pour compléter l'Écothèque et développer un véritable support d'aide à la décision en éco-conception, il était alors nécessaire d'élaborer une méthode multicritère permettant au futur outil de réaliser une sélection pertinente et adaptée au contexte des solutions en fonction des caractéristiques intrinsèques du projet.

Pour cela, la première étape a été de lister tous les « objets » d'un projet de mobilité sur rail sur lesquels pouvait porter l'éco-conception, c'est-à-dire tous les composants (produits ou matériaux) physiquement mis en œuvre, et de les développer jusqu'à plusieurs niveaux de détail. Pour faciliter la collecte d'information, en raison du nombre très important d'objets de conception à récolter, l'équipe du BIM de Systra a été sollicitée. Le « BIM » désigne, en anglais, le « *Building Information Modeling* » qui se traduit par la Modélisation des Informations (ou données) du Bâtiment. Le terme bâtiment ici est générique et englobe également les infrastructures » (Objectif BIM, s. d.). L'équipe du BIM a alors accepté de communiquer, en interne, leur travail de recensement (réalisé auprès des différentes directions, départements et services de Systra) des « objets » mis en œuvre sur les projets d'ingénierie. Cet inventaire exhaustif a ensuite été retravaillé afin de sélectionner les objets les plus pertinents et pour lesquels il est possible, techniquement et réglementairement, d'envisager des alternatives de conception. Ils ont ensuite été reclassés de manière à pouvoir être déroulés en fonction du type de projet.

Pour des raisons de confidentialité, les « objets BIM » ne pourront être détaillés dans cet essai. Les paragraphes et figures suivants présentent l'architecture de classement obtenue après le retraitement des données du BIM. Celle-ci a été réalisée grâce à XMind 8, un logiciel de carte mentale gratuit.

Il convient de noter dans un premier temps que les mesures d'écologie (correspondants à la séquence « Éviter, réduire et compenser ») ont été écartées du périmètre de l'éco-conception car elles s'insèrent dans une démarche globale menée en parallèle et de manière systématique dans le cadre des études d'impacts.

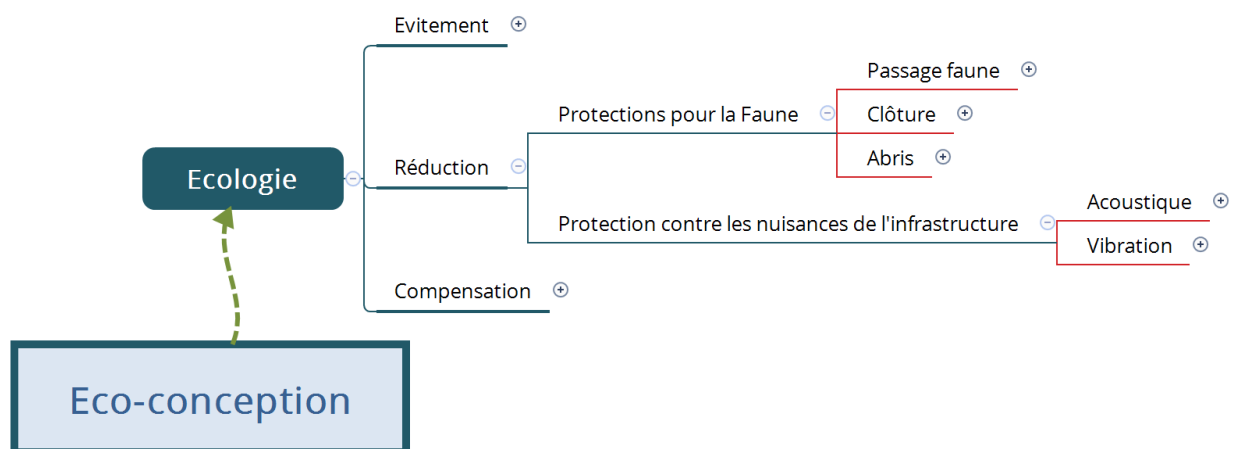
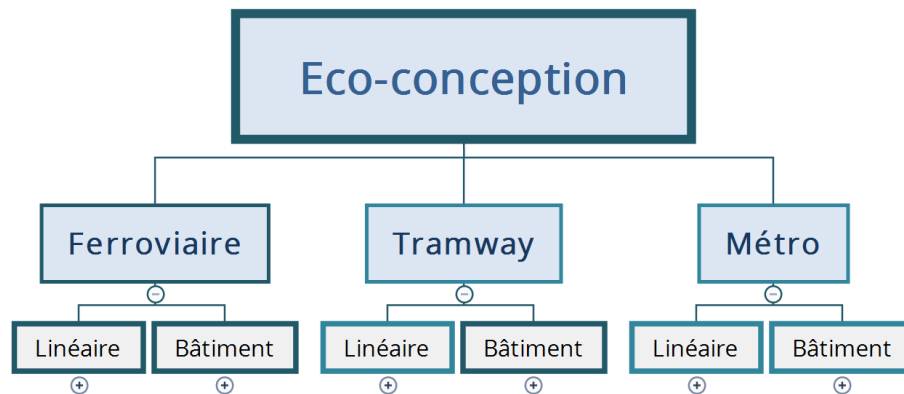


Figure 3.5 Modélisation des mesures d'écologie dans l'architecture du classement des objets

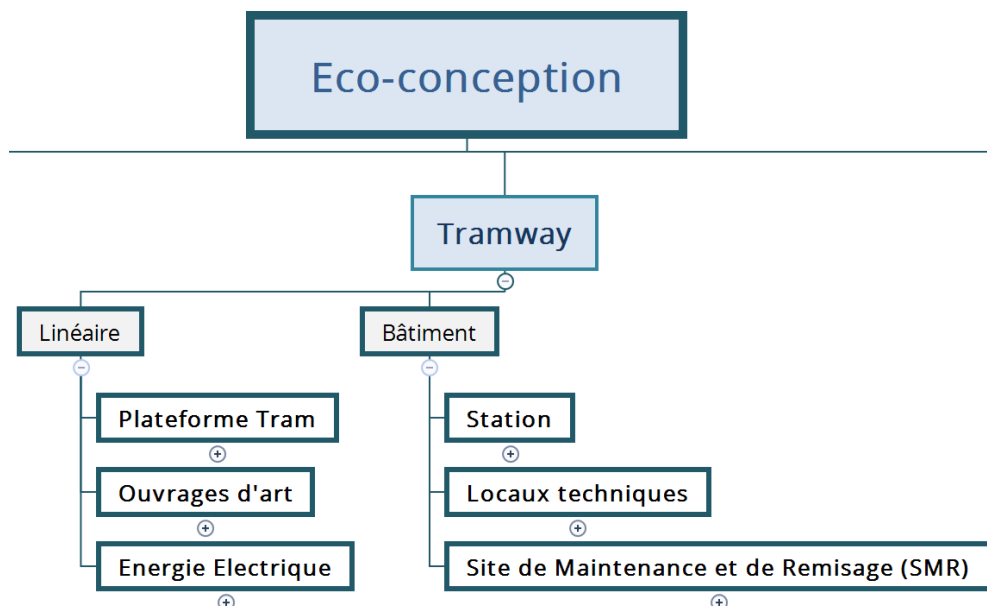
Pour commencer, les objets ont été découpés par type de projet de mobilité : ferroviaire (incluant donc les TGV, TER et RER), le tramway et le métro. Chacune de ces trois grandes familles a ensuite été divisée en deux parties pour séparer les bâtiments (comme les gares et les bâtiments techniques) et les infrastructures linéaires (voies ferrées, quais, etc.).



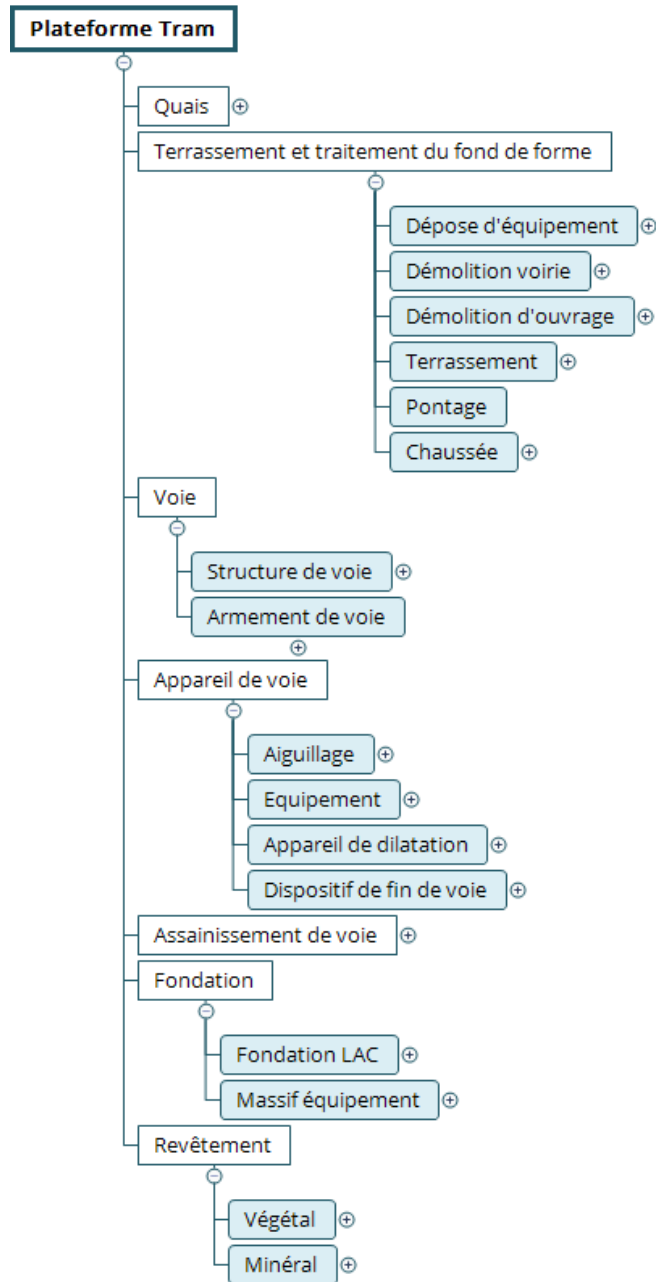
**Figure 3.6 Premier niveau de l'architecture de classement des objets**

Ensuite, plusieurs niveaux de développement permettent de détailler les ouvrages mis en œuvre dans la conception d'infrastructures linéaires et de bâtiments. Dans un premier temps, les grands types d'ouvrages ont été listés. Puisqu'il serait trop consistant de faire le détail de toutes les catégories d'ouvrages, l'exemple du tramway sera utilisé ici.

Ainsi, les grandes catégories d'ouvrages identifiées pour les projets de tramway sont les suivantes :



**Figure 3.7 Second niveau de l'architecture de classement des objets**

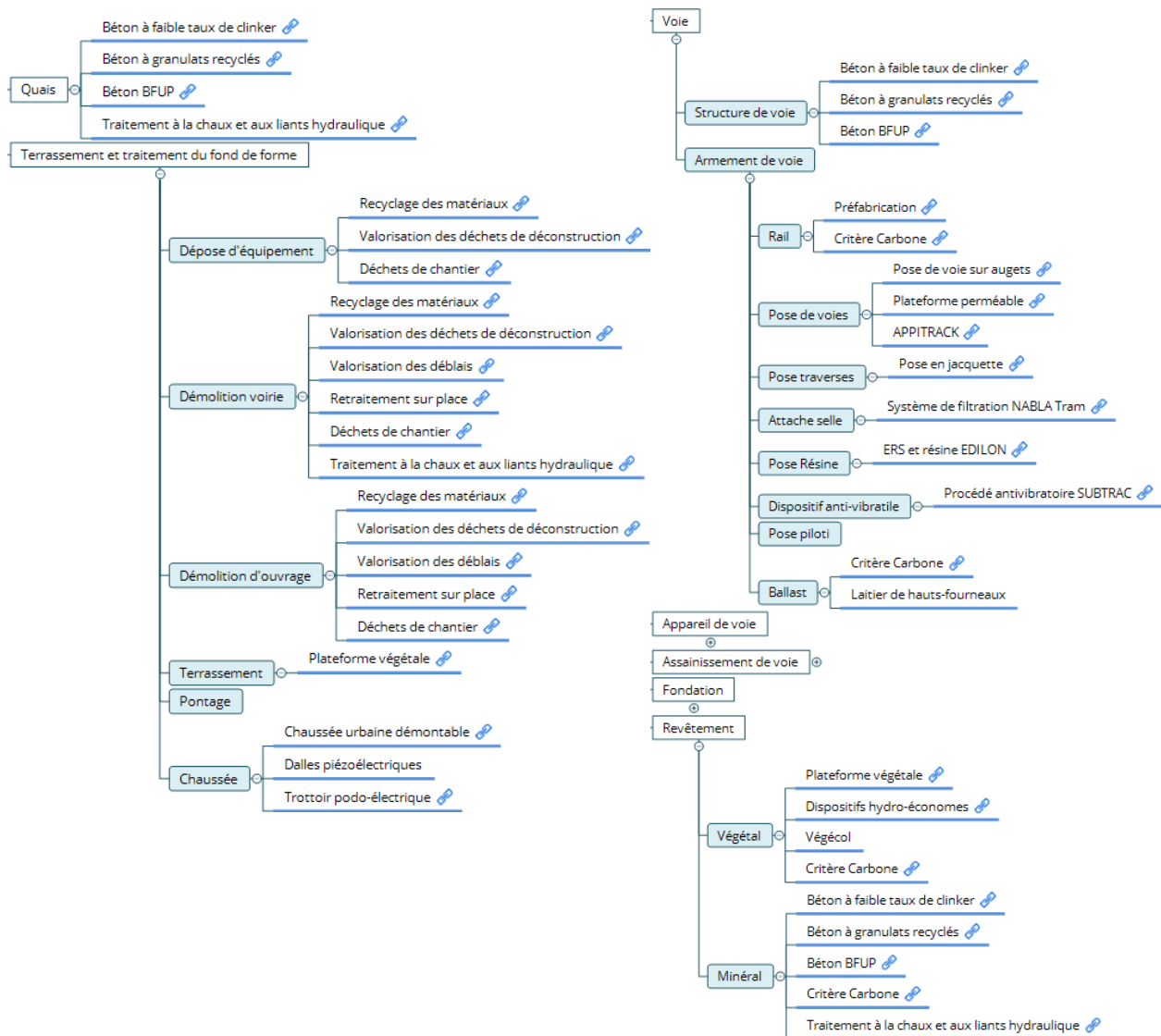


Chaque grande catégorie d'ouvrages contient les principaux éléments de conception. Pour prendre l'exemple d'une plateforme de tramway, sa mise en œuvre requiert des travaux de fondation et d'assainissement, des travaux de terrassement et de traitement du fond de forme, la construction de quais et de voies de circulation des rames, ainsi que leur appareillage et leur revêtement.

Une ou plusieurs sous-divisions sont parfois ajoutées pour permettre de préciser les différents éléments de conception. Le choix a été fait de ne pas aller plus loin dans les niveaux de détails (par exemple, en allant jusqu'à diviser en fonction des types de matériaux ou de procédés). En effet, cela n'aurait pas été pertinent, car plus le classement tend à être spécifique et plus il est compliqué de trouver des solutions d'éco-conception propres à chaque élément, notamment en raison de contraintes techniques (faisabilité notamment), économiques, réglementaires et normatives (calibrage, sécurité, etc.) très fortes. Cependant, il convient de rappeler que l'outil étant fortement modulable, des subdivisions et des éléments de conception supplémentaires pourront être ajoutés si le besoin s'en fait sentir à l'usage par les chefs de projet.

**Figure 3.8 Troisième niveau de l'architecture de classement des objets**

Il s'agit là du dernier niveau de détail de l'architecture de classement des objets mis en œuvre dans la conception d'infrastructures linéaires de tramway. À partir de là, les différentes solutions d'éco-conception regroupées sur l'Écothèque ont été reliées grâce à des hyperliens aux éléments de conception. Contrairement à l'Écothèque qui classait les fiches éco-conception en fonction de leur enjeu principal sans permettre de les trier en fonction des caractéristiques du projet à concevoir, les solutions sont ici directement reliées aux éléments de conception sur lesquels elles peuvent être appliquées.



**Figure 3.9 Solutions d'éco-conception**

Ainsi, un chef de projet peut constater que pour son projet de conception d'une plateforme de tramway, il peut opter pour une plateforme végétalisée avec une pose de voie sur augets, la construction de quais à partir des matériaux issus des travaux de déblais sur le site ou d'un béton à faible taux de clinker et pour finir, un revêtement végétal comme le Végécol® de Colas.

Cette carte mentale ne constitue pas un outil en tant que tel : il s'agit d'une partie de l'architecture du logiciel qui sera développée par l'équipe de développeurs du service Innovation de Systra. En effet, une fois la méthodologie finalisée par le département d'Ingénierie Environnementale et Durable, elle devra être traduite en un logiciel d'analyse multicritère parfaitement fonctionnel et disponible en interne.



### 3.2.3 Fonctionnement de l'outil

L'objectif de l'outil qui sera développé par l'Innovation est de permettre une analyse multicritère des différentes solutions, à partir de données d'entrée qui seront renseignées par l'utilisateur.

Pour cela, le chef de projet (ou le chargé d'éco-conception) devra rentrer les caractéristiques de son projet, en sélectionnant les différents types d'ouvrages à réaliser, mais également en indiquant les données intrinsèques du projet : situation géographique (permettant d'en déduire un type de climat et des contraintes environnementales, par exemple la corrosion pour les milieux à l'air marin ou les risques d'inondation), le budget accordé à l'éco-conception (possibilité de mettre en œuvre des solutions générant un surcoût ou à l'inverse, nécessité de réduire les coûts de la construction et/ou de l'exploitation).

En fonction de ces paramètres, le logiciel devra alors être en mesure de présenter à l'utilisateur les solutions d'éco-conception sélectionnées dans la base de données Écothèque en fonction de leur adéquation avec les caractéristiques du projet.

De cette manière, l'outil facilite la prise de décision pour l'éco-conception en permettant un gain de temps conséquent, à la fois à l'utilisateur chef de projet qui pourra alors identifier rapidement si des solutions existent et peuvent s'appliquer à son projet (ce qui peut également l'amener à répondre à des appels d'offres sur de nouveaux marchés pour lesquelles l'éco-conception est de plus en plus une composante indispensable du cahier des charges, par exemple dans le secteur aéroportuaire), mais également au chargé d'éco-conception qui pourra observer un gain de productivité. En effet, lorsqu'il est sollicité pour une mission d'éco-conception sur un nouveau projet, le logiciel lui permettra de faire un rapide tour d'horizon des solutions existantes, quand il doit aujourd'hui passer quelques heures à reprendre des guides et des retours d'expériences pour émettre des propositions adéquates au projet. En effectuant régulièrement une mise à jour de la base donnée grâce à une veille environnementale et technologique, le logiciel peut ainsi devenir un outil de travail performant.

Cependant, il convient de noter que le logiciel ne permet que de faire un premier tri pour dégager les solutions qui, en théorie, correspondent au projet. L'approfondissement par un expert en éco-conception, en collaboration avec les équipes techniques, reste bien évidemment indispensable. En outre, l'outil ne peut se substituer au travail d'un responsable éco-conception, qui reste d'autant plus en charge de l'animation de la démarche auprès des différentes équipes.

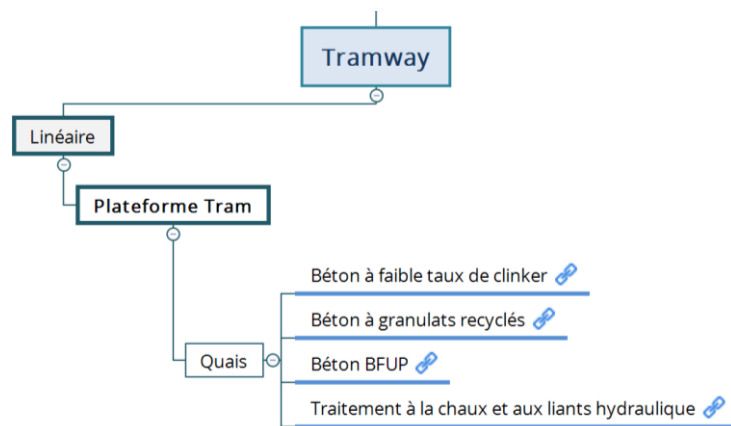
Ainsi, cette méthodologie de création d'un outil d'aide à la décision, telle qu'elle a été élaborée, répond à ces objectifs : elle permet de satisfaire le besoin des chefs de projet dans la facilitation des choix d'éco-conception, lorsque le budget ou l'ampleur du projet ne permettent pas de faire intervenir un expert. C'est également un outil pertinent pour collecter les retours d'expérience de l'entreprise et les capitaliser. En contribuant à hauteur de quelques heures mensuelles pour tenir à jour la base de données, le chargé d'éco-

conception s'assure ensuite de gagner un temps précieux sur les budgets horaires qui lui sont attribués pour ses missions. Ainsi, l'économie réalisée sur la phase de recherche de propositions peut être réinvestie dans leur approfondissement et dans l'élaboration d'une argumentation pour convaincre les clients, les chefs de projet et les équipes techniques de mener des expérimentations et d'opter pour des alternatives de conception innovantes et/ou performantes sur le plan environnemental. En outre, cela pourrait mener au développement de projets d'éco-conception plus ambitieux. Enfin, ce logiciel étant facile d'utilisation et peu chronophage, son acceptation auprès des chefs de projet est facilitée.

### 3.2.4 Limites de la méthodologie de l'outil

Cette méthodologie pour la conception d'un outil d'aide à la décision n'est évidemment pas sans présenter certaines limites.

D'une part, il convient de garder à l'esprit que cet outil vise à faciliter le processus de recherches de solutions et à obtenir facilement et rapidement un tour d'horizon des alternatives de conception applicables à un projet donné. Cependant, le logiciel n'intègre pas de méthode permettant de comparer les différentes solutions entre elles, sur leurs aspects environnementaux, économiques et techniques, et d'en déterminer la solution la plus efficace à mettre en œuvre dans un cas particulier.



Pour prendre l'exemple de la conception de quais d'une plateforme de tramway, plusieurs options d'éco-conception s'offrent au chef de projet : le recours à du béton à faible taux de clinker, l'utilisation de granulats recyclés, ou encore le choix d'un béton Fibré à Ultra-Haute Performance. Chacune de ces solutions est pertinente d'un point de vue environnemental, mais sur des aspects différents.

**Figure 3.10 Solutions d'éco-conception pour les quais des plateformes de tramway**

Le béton BFUP tient son intérêt dans sa très grande durabilité et sa résistance mécanique, mais requiert un fort dosage en ciment, très émetteur de gaz à effet de serre (Mülberg et Al, 2014). Le béton à granulats recyclés, quant à lui, permet de limiter les déchets envoyés à l'enfouissement et de réduire l'exploitation des matières premières, mais présente des performances moindres sur le long terme (sa porosité le rend deux fois perméable que du béton classique, augmentant le risque de corrosion des armatures). (Schmitt, Mai-Nhu, Rougeau, Djerbi Tegguer, et Saillio, 2015) Le choix final, entre ces différentes propositions, reviendra à l'utilisateur qui reste décideur en fonction de l'orientation qu'il souhaite donner à son projet.

Quant à l'aspect technique, l'outil propose des solutions dont la faisabilité est théorique. Il est ensuite indispensable de recouper avec les équipes techniques afin de s'assurer que les ressources sont disponibles (compétences, accessibilité des technologies, etc.).

D'autre part, cet outil d'aide à la décision ne se substitue pas au travail de l'expert en éco-conception, qui sera en effet le plus à même de trancher les différentes solutions, de les approfondir et de les argumenter. Il s'agit d'un outil complémentaire visant à faciliter l'intégration de solutions durables très en amont dans la conception par l'information des chefs de projet sur les alternatives qu'il est possible de mettre en œuvre sur un projet et par l'accompagnement du chargé d'éco-conception dans sa recherche de solutions. L'outil n'a pas non plus vocation à remplacer une démarche d'éco-conception, qui nécessite l'intégration de l'ensemble des parties prenantes de la chaîne de conception à travers une information et une sensibilisation efficace.

### **3.2.5 État d'avancement et perspectives de l'outil**

La méthodologie de cet outil est encore en cours de développement. En effet, la partie permettant d'intégrer à l'analyse multicritère les données intrinsèques du projet n'a pas encore été réalisée et la conception du support logiciel n'est pas commencée. Cet outil s'intégrant dans un projet de Recherche & Développement mené par le département Ingénierie Environnementale et Durable de Systra en parallèle de missions de conseil en éco-conception, le délai de cinq mois imparti pour l'essai-intervention n'était pas suffisant pour présenter une méthodologie finalisée. Le logiciel devrait être achevé dans les prochains mois suivant la remise de cet essai.

En ce qui concerne les perspectives à long terme de l'outil, il s'agit d'une méthodologie qui mise sur l'amélioration continue. D'une part, son architecture pourra être modifiée après une première phase d'expérimentation afin de la rendre la plus cohérente possible avec la réalité de la conception des bâtiments et infrastructures de transports sur rail. Les solutions, quant à elles, doivent être régulièrement éditées, puisque l'outil prend son intérêt dans un approvisionnement régulier en fiches procédés, matériaux et technologies et risquerait de devenir rapidement obsolète en l'absence d'une mise à jour régulière.

D'autre part, à partir de cette méthodologie, il sera ensuite possible d'aller plus loin dans la facilitation de la prise de décision en développant une matrice permettant de déterminer une solution optimale parmi les différentes alternatives applicables au projet. Sur le principe de la matrice de Pugh, les solutions seront évaluées sur différents critères pondérés (en fonction de leur importance pour le client), tels que leur coût, leur impact économique, leur performance de réduction des impacts environnementaux, leur valeur sociale, leur faisabilité technique, la rapidité de mise en œuvre et leur originalité. (Kojmane et Aboutajeddine, 2015) De manière plus simplifiée, il est pour l'instant prévu de présenter les solutions finales sous forme de diagrammes araignées, afin d'afficher visuellement les points forts et les points faibles de chaque solution et de simplifier à l'utilisateur leur comparaison et la prise de décision.

### 3.2.6 Faiblesses et menaces de l'outil

Ce futur outil d'aide à la décision en éco-conception ne sera pas sans présenter certaines imperfections. Comme il a déjà été abordé, l'outil sera fortement menacé par l'obsolescence, puisqu'il nécessite une intervention humaine régulière pour le garder à jour. Ainsi, il est nécessaire que le chargé d'études éco-conception dispose d'un minimum de temps sur son plan de charge alloué à la veille et à l'alimentation de l'Écothèque. A défaut, l'outil perdra complètement son intérêt. Cette veille présente le double avantage de permettre aux ingénieurs de maintenir le niveau de conseil et de compétences attendu sur l'ensemble de leurs missions.

Une autre menace inhérente à l'intervention humaine pour la création de fiches éco-conception est le manque de variété des solutions. En effet, elles devront être diversifiées pour permettre à l'utilisateur de réaliser des choix en fonction de ses préoccupations, mais aussi des spécificités et contraintes de son projet. Cependant, l'outil présente le risque d'être alimenté majoritairement en solutions qui auront retenu l'attention de la personne en charge de la base de données, selon ses propres intérêts et sans tenir compte de la réalité du terrain. Par exemple, il pourrait être tenté de proposer principalement des innovations technologiques (potentiellement onéreuses) au détriment de techniques de conception alternatives économiques, ou se concentrer sur un enjeu environnemental en particulier, qui lui apparaît prioritaire. Ainsi, pour que l'outil soit réellement pertinent et réponde aux besoins des chefs de projets, il est absolument indispensable de veiller à proposer des solutions variées. L'une des manières envisageables de palier ce risque pourrait être de proposer à l'ensemble du département Ingénierie Environnementale et Durable de contribuer à l'Ecothèque (sur base volontaire et/ou à hauteur de quelques heures par mois), permettant ainsi de diversifier les expertises, centres d'intérêts et angles de vue.

Enfin, la limite de cet « investissement en temps de travail » d'un ou plusieurs salariés de Systra, nécessaire pour éviter l'obsolescence, est le fait que l'outil représentera un coût continu pour le bureau d'études. Il convient néanmoins de nuancer cette faiblesse, car si le choix avait été fait de payer une licence d'exploitation pour un logiciel similaire, la dépense mensuelle à prévoir aurait certainement été supérieure.

De plus, la menace principale qui pèse sur cet outil d'aide à la décision est sa capacité à être intégré par les chefs de projets dans leurs processus de conception. C'est notamment pour cette raison que les chefs de projets seront consultés lors d'un atelier qui se tiendra le 19 septembre 2018. Cet échange vise à faire un état des lieux des enjeux de l'intégration de l'éco-conception dans les projets de Systra, à présenter la méthodologie de l'outil d'aide à la décision actuellement en développement, à valider les besoins des chefs de projet en matière d'éco-conception et connaître leurs habitudes sur projet. Plusieurs ateliers seront organisés pour les amener à partager leurs réflexions et leurs attentes sur les évolutions attendues de l'outil. L'objectif de la réunion sera d'utiliser leurs retours pour développer un logiciel adapté à leurs missions de chefs de projet et d'en faciliter la mise en œuvre opérationnelle.

Une fois le logiciel d'aide à la décision finalisé et accessible aux chefs de projets de Systra, il sera primordial d'en faire la promotion. Pour cela, il pourra être nécessaire de mettre en place une démarche pour les pousser à intégrer l'utilisation de l'outil de manière systématique sur les projets. Dans ce but, un rapprochement a été fait avec l'animateur de « La Fabrique », du département Innovation, qui organise des ateliers de *Smart Thinking*, remue-méninges et animations de réunions. L'idée à développer est d'instaurer une démarche d'éco-conception au sein du bureau d'étude, visant à prévoir (dans le planning et le budget) un atelier d'information et d'accompagnement à l'éco-conception pour les chefs de projets et les experts de la conception, à chaque début de projet d'infrastructures de transport. L'objectif sous-jacent est de « planter la graine de l'éco-conception » dans les projets à travers une sensibilisation des décideurs et d'attiser leur intérêt.

En cas d'échec pour faire valoir le logiciel d'aide à la décision comme ressource indispensable dans les projets de conception, l'investissement financier et temporel engagé sur ce projet de Recherche & Développement risquera alors d'avoir été vain. En outre, il est crucial de veiller dès la phase de développement du logiciel que celui-ci est parfaitement adapté aux besoins et aux contraintes de ses utilisateurs principaux, mais également de réaliser une promotion de l'outil suffisante pour en assurer l'intégration dans les projets et une utilisation pérenne. Enfin, certaines limites et faiblesses du futur logiciel d'aide à la décision, comme le risque obsolescence par exemple, sont intrinsèquement liées à sa nature même d'outil.

## CONCLUSION

Au cours des vingt dernières années, le transport sur rail s'est largement développé en France, qu'il soit urbain, périurbain ou national. Cela s'explique, d'une part, par l'urbanisation et la volonté des pouvoirs publics de répondre à la saturation des réseaux routiers par le développement d'une offre alternative au transport sur route, qui soit « moins polluante et plus efficace dans les agglomérations denses », notamment à travers les trains urbains, le métro et le tramway, dont la part modale a augmenté de 68% depuis 1990. D'autre part, l'accroissement des LGV depuis les années 1980 a permis de réduire les temps de trajets et de concurrencer l'usage de la voiture et de l'avion. (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2016) Il était donc important de s'intéresser aux impacts générés par le développement des infrastructures et des bâtiments nécessaires à la circulation des transports ferrés.

L'objectif général de cet essai était de développer une méthode pour faciliter l'intégration des préoccupations environnementales dans la conception des infrastructures et bâtiments nécessaires au fonctionnement des transports sur rail. Pour ce faire, l'intérêt d'intégrer l'environnement en amont des projets est démontré, notamment parce qu'il est considéré que 70 à 80% des impacts y seront déterminés (Pôle Éco-conception, s. d.). Des solutions d'éco-conception applicables aux projets d'infrastructures de transport sur rail sont également apportées, et s'intègrent dans un outil d'aide à la décision à destination des chargés d'éco-conception et des chefs de projet du bureau d'étude Systra, dont la méthodologie a été élaborée au cours d'un stage-intervention de six mois.

Cet essai aura donc présenté dans un premier temps les enjeux économiques, sociaux et environnementaux du secteur des transports sur rail en France. L'usage des transports est aujourd'hui placé au cœur de nos modes de vie : ils nous sont indispensables pour effectuer nos déplacements du domicile vers nos lieux de travail ou d'études et nos trajets professionnels, ainsi que pour nous rendre sur nos lieux de loisirs et de vacances. Ainsi, la mobilité en France est source de développement économique et de liberté. Pourtant, elle n'est pas sans présenter des externalités négatives sur l'environnement : émissions de GES, consommation d'énergie et de matières premières, perturbations de la biodiversité... Si les transports ferrés sont souvent considérés comme un mode « écologique » en raison de leur absence d'émission de GES et de consommation de pétrole à l'utilisation, les impacts de la construction et de l'exploitation de leurs infrastructures sont souvent oubliés. L'Analyse de Cycle de Vie Conséquentielle réalisée par les chercheurs américains Chester et Horvath en 2009, qui considérait dans le périmètre de l'étude l'ensemble des co-produits nécessaires au fonctionnement des différentes catégories de transports, a permis de démontrer que l'inclusion des bâtiments et infrastructure (voies ferrées, quais, etc.) alourdissait l'évaluation environnementale des transports sur rail de 155%. Il est donc indispensable de réduire leurs impacts, et ce, dès les premières phases de conception.

Plusieurs techniques de conception alternatives visant à intégrer les considérations environnementales ont ensuite été présentées. Sept solutions d'éco-conception ont été sélectionnées pour être développées, pour leur capacité à répondre à une ou plusieurs problématiques posées par la technique de référence, mais également pour leur aspect transversal sur les différentes catégories d'infrastructures. Ces solutions sont accompagnées d'une analyse permettant d'évaluer leur performance sur douze critères : gestion des matériaux, de l'eau et de l'énergie, émissions de GES et pollution atmosphérique, préservation des matières premières et de la biodiversité, insertion paysagère et emprises, entretien et durabilité, coût global, conditions de réalisation. Enfin, un avis environnemental, économique et technique a été émis pour chacune de ces solutions.

Enfin, la troisième partie exposait la méthodologie pour la création d'un outil d'aide à la décision en éco-conception, élaborée au cours d'un stage-intervention de six mois au sein du bureau d'études Systra, spécialisé dans l'ingénierie et la conception de projets de mobilité. Dans un premier temps, la création d'une base de données en ligne, accessible en interne, a permis de compiler les solutions d'éco-conception issues de retours d'expérience et des différents guides rédigés par les précédents experts éco-conception de l'entreprise. Celle-ci vise à être alimentée et mise à jour régulièrement. Dans un second temps, un arbre des différents objets de projets de transports sur rail, sur lesquels il est possible de faire valoir des solutions d'éco-conception, a été réalisé sous forme de carte mentale. L'objectif est d'utiliser cette base de données et ce classement comme architecture d'un logiciel d'aide à la décision en éco-conception, qui sera prochainement développé par les départements IED et Innovation de Systra.

En somme, l'objectif principal de cet essai a été atteint. En effet, il a permis de mettre en évidence la part des infrastructures dans le résultat de l'évaluation environnementale des transports linéaires sur rail, mais également l'importance de considérer et de réduire leurs impacts dès leur conception. Des exemples de solutions d'éco-conception pertinentes ont été apportés, démontrant ainsi la possibilité de concevoir autrement, en réduisant les pressions exercées sur l'environnement. Enfin, bien que l'outil ne soit pas finalisé, la méthodologie exposée permet de comprendre pourquoi et comment développer une méthode d'aide à la décision en éco-conception propre au secteur des transports ferrés.

Cet essai apporte des clés pour réduire les impacts environnementaux de la conception d'infrastructures de transports. Aussi efficace soit-elle, aucune solution d'éco-conception ne pourra limiter complètement les pressions écologiques de leur construction et de leur exploitation : c'est pourquoi une conception durable devrait s'accompagner de changements sociétaux. Dans les grandes métropoles, comme alternative à la construction de nouvelles infrastructures pour augmenter la capacité d'accueil des trains et leur fréquence de passage, des solutions comme le télétravail ou les horaires de bureau décalés pour éviter les heures de pointe, permettent de répondre à la problématique de l'engorgement des transports urbains. Pour les déplacements à plus grande échelle, ils pourraient être limités grâce au développement des téléconférences.

## RÉFÉRENCES

- Actu Archi. (2016). In Vivo à Paris par XTU Architects. Repéré à <https://www.actuarchi.com/in-vivo-paris-x-tu-architects-algue/>
- Actu Environnement. (2012). Analyse du Cycle de Vie. Repéré à [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie\\_acv.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/analyse_du_cycle_de_vie_acv.php4)
- Actu environnement. (s. d.). Clinker. Repéré à [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/clinker.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/clinker.php4)
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). (2013). *Avis de l'Ademe – Le solaire photovoltaïque*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-sur-solaire-photovoltaïque-2013.pdf>
- Ademe. (2018a). Chiffres clés. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>
- Ademe. (2017a). *Déchets des travaux publics*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-dechets-tp-2017-09.pdf>
- Ademe. (2016). Impacts des transports sur l'environnement. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/elements-contexte/impacts-transport-l'environnement>
- Ademe. (2018b). L'éclairage. Repéré à <http://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/maitriser-lenergie-atelier-production/equipements-electriques/dossier/leclairage/conseils-agir>
- Ademe. (2015). *L'énergie éolienne*. Repéré à <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-energie-eolienne.pdf>
- Ademe. (2011). *Les transports : cahier technique n°4*. Repéré à [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cahier-4\\_transport.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cahier-4_transport.pdf)
- Ademe. (2017b). *Mener à bien un projet photovoltaïque*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-electricite-solaire.pdf>
- Ademe. (2018c). Qu'est-ce que l'ACV. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
- Ademe. (s. d.). Valorisation de la matière. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-matiere>
- Agence de l'énergie Val de Marne Vitry. (s. d.). *Cahier de recommandations environnementales n°1. Comment optimiser les performances énergétiques de votre habitation ?* Repéré à [http://www.environnement-valdebievre.fr/files/files/CRE/cahier\\_1\\_energie.pdf](http://www.environnement-valdebievre.fr/files/files/CRE/cahier_1_energie.pdf)
- Ageron, P. (2014). Notion à la une : intermodalité. Repéré à <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/notion-a-la-une/notion-a-la-une-intermodalite>
- Aladjadi, G. et Rolland, B. (2010). Photovoltaïque : idées reçues et enjeux industriels. *Mines Revue des Ingénieurs*, 446, 29-31 Repéré à [https://www.mines-paris.org/global/gene/link.php?doc\\_id=360&fg=1](https://www.mines-paris.org/global/gene/link.php?doc_id=360&fg=1)



- AquaTerra Solutions. (s. d.). *Confortement de talus par gabion, ligne SNCF Monnenheim – Sarreguemines traversant La Sarre (commune de Wittring 57)*. Repéré à [http://www.gabions.fr/files/piecejointe/552\\_file\\_piecejointe\\_572.pdf](http://www.gabions.fr/files/piecejointe/552_file_piecejointe_572.pdf)
- AREP. (2012). Halte écodurable Gravigny-Balizy. Repéré à [http://www.arep.fr/projets/3-16/cat\\_transport/halte\\_ecodurable\\_gravigny-balizy](http://www.arep.fr/projets/3-16/cat_transport/halte_ecodurable_gravigny-balizy)
- AREP. (2008). Halte modulaire éco-durable. Repéré à [http://www.arep.fr/projets/3-25/cat\\_transport/halte\\_modulaire\\_eco-durable](http://www.arep.fr/projets/3-25/cat_transport/halte_modulaire_eco-durable)
- Baechler, L. (2012). La bonne gestion de l'eau : un enjeu majeur du développement durable. *L'Europe en formation*, n° 365, 3-21. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-l-europe-en-formation-2012-3.htm>
- Billard, Y., Bazin, F. et Lacroix, O. (2012). *Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie : état des lieux international*. (Rapport de recherche, étude n° 11-0912/1A) Repéré à [https://www.record-net.org/storage/etudes/11-0912-1A/rapport/Rapport\\_record11-0912\\_1A.pdf](https://www.record-net.org/storage/etudes/11-0912-1A/rapport/Rapport_record11-0912_1A.pdf) *Cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics de travaux (CCAG)*, arrêté du 8 septembre 2009, art. 2. Repéré à <http://www.marche-public.fr/CCAG-travaux/02-definitions.htm>
- Boillat P. et Pini, G. (2005). De la mobilité à la mobilité durable : politiques de transport en milieu urbain : mobilité spatiale et mobilité durable. Dans A. Da Cunha, P. Knoepfel, J-P. Leresche et S. Nahrath (dir.), *Enjeux du développement urbain durable : transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*. Repéré à <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=WwNVn2pzulsC&oi=fnd&pg=PR6&dq=d%C3%A9veloppement+mobilit%C3%A9+%C3%A9talement+urbain&ots=VrLHN0CbP-&sig=7cq9dLF2hOTjGhjbkVJsJ8GMUB0#v=onepage&q=voiture&f=false>
- Carbone 4. (2015). *Guide relatif à l'usage d'une démarche carbone au sein des marchés publics et des politiques publiques*. Repéré à [https://www.iledefrance.fr/sites/default/files/20151112\\_guidecarbone\\_ppmp\\_vf.pdf](https://www.iledefrance.fr/sites/default/files/20151112_guidecarbone_ppmp_vf.pdf)
- Caron. (2009). Le gazon peut capter le gaz carbonique. Repéré à <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-votre-pelouse-peut-protoger-environnement-867/page/2/>
- CDC Habitat. (2016). Le projet In Vivo lauréat de l'appel à projets Réinventer Paris. Repéré à <http://www.sni-groupesni.fr/actualites-presse/actualites/le-projet-in-vivo-laureat-de-lappel-a-projets-reinventer-paris.html>
- Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) d'Ile-de-France. (2010). *Les écomatériaux dans l'aménagement et la construction en Ile-de-France*. Repéré à [http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etudeecomateriaux25062010\\_cle2e114c.pdf](http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etudeecomateriaux25062010_cle2e114c.pdf)
- Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). (s. d.). Découvrir l'eau - Préservation - Réduire la consommation et limiter les pertes. Repéré à [https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/01\\_reduire.htm](https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/01_reduire.htm)
- CNRS. (2015). Comment fait-on une Analyse de Cycle de Vie. Repéré à [https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/01\\_reduire.htm](https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/01_reduire.htm)
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). (s. d.). Toitures végétalisées : une contribution au développement durable. Repéré à <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/decembre-2007/toitures-vegetalisees-une-contribution-au-developpement-durable.html>

- Certivéa. (s. d.). Label Bâtiment Biosourcé. Repéré à <https://www.certivea.fr/offres/label-batiment-biosource>
- Champagne, E. et Negron-Poblet P. (2012). La mobilité urbaine durable : du concept à la réalité. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 11*. Repéré à <https://journals.openedition.org/vertigo/11779>
- Chester, M. V. et Horvath, A. (2009). *Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains*. (Rapport de recherche). Berkeley, Californie, Etats-Unis. : Environmental Research Letters. Repéré à <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/4/2/024008/pdf>
- Clima Maison. (s. d.). Tertiaire. Repéré à <https://www.climamaison.com/lexique/tertiaire.htm>
- Commission Européenne. (2016). ENERGY CAPS – Résultats en bref. Des supercondensateurs propres et écologiques pour les applications d'efficacité énergétique et de transport. Repéré à [https://cordis.europa.eu/result/rcn/148917\\_fr.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/148917_fr.html)
- Connaissance des énergies. (2015). Solaire thermique. Repéré à <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>
- Conseil canadien du bois. (s. d.). Durabilité des Alternatives au Bois. Repéré à <http://cwc.ca/fr/proprietes-du-bois/durabilite/solutions-pour-la-durabilite/durabilite-des-alternatives-au-bois/>
- ConsoGlobe. (2016). Biofaçades : des murs en micro-algues pour nettoyer les villes demain. Repéré à <https://www.consoglobe.com/biofacades-murs-micro-algues-cg>
- Crozet, Y. (2018). Mobilité, temps de transport et investissements collectifs. *Réalités Industrielles : Les mobilités du futur : vecteurs techniques, modèles économiques et politiques publiques*, 2018/2, 12-15. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2018-2-p-12.htm>
- Dandres, T. (2012). *Développement d'une méthode d'Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle prospective macroscopique : évaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025*. (Thèse de doctorat). École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada. Repéré à [https://publications.polymtl.ca/881/1/2012\\_ThomasDandres.pdf](https://publications.polymtl.ca/881/1/2012_ThomasDandres.pdf)
- Deloitte. (2008). *Efficacités énergétique et environnementale des modes de transport*. Repéré à [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51911\\_synthese-transport.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/51911_synthese-transport.pdf)
- fDепarte, A. (2014). Chimie et matériaux biosourcés : améliorer l'impact environnemental des produits. *Ademe & Vous, recherche*, 9, 1-2. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-lalettre-recherche-09-fr.pdf>
- Devis travaux. (2015). Mur de soutènement : prix et techniques de construction Repéré à <https://devistravaux.org/construction-renovation/maconnerie/cout-mur-de-soutenement/>
- Dictionnaire Environnement. (s. d.). Analyse du Cycle de Vie. Repéré à [https://www.dictionnaire-environnement.com/analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie\\_acv\\_ID706.html](https://www.dictionnaire-environnement.com/analyse_du_cycle_de_vie_acv_ID706.html)
- Duverger, A. (2017). Béton bas carbone : de quoi parle-t-on? Repéré à [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/beton-bas-carbone.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/beton-bas-carbone.htm)
- Ecocem. (2011). *Bétons « bas carbone », bétons à la carte. Mieux maîtriser l'impact environnemental de la construction*. Repéré à [http://www.ecocem.fr/bibliotheque/dossier\\_presse/ecocem\\_dp\\_\\_betons\\_bas\\_carbone\\_2011.pdf](http://www.ecocem.fr/bibliotheque/dossier_presse/ecocem_dp__betons_bas_carbone_2011.pdf)

Ecomundo. (s. d.). Logiciel Corine. Repéré à <https://www.ecomundo.eu/fr/logiciels/corine-eco-conception>

Empreinte Carbone Québec. (s. d.). Empreinte carbone des produits. Repéré à <http://www.empreintecarbonequebec.org/fr/definition.php>

Ennesys. (s. d.a). Applications. Repéré à <http://www.ennesys.com/applications/>

Ennesys. (s. d.b). Technologie. Repéré à <http://www.ennesys.com/technologie/>

Futura Sciences. (2018). FSC & PEFC: pour des forêts durables. Repéré à <http://www.natura-sciences.com/environnement/fsc-pefc-durable689.html>

Futura Sciences. (s. d.). Graphène. Repéré à <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-graphene-4713/>

Galus, C. (2008, 13 mars). Les cimentiers travaillent à la mise au point d'un "béton vert". *Le Monde*. Repéré à [https://www.lemonde.fr/planete/article/2008/03/13/les-cimentiers-travaillent-a-la-mise-au-point-d-un-beton-vert\\_1022415\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2008/03/13/les-cimentiers-travaillent-a-la-mise-au-point-d-un-beton-vert_1022415_3244.html)

Gualous, H., Gallay, R. et Berthon, A. (2017). *Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport*. Repéré à <https://www.garmanage.com/atelier/root/public/Contacting/biblio.cache/REE-final.pdf>

Grandjean, A., Ledoux, R. et Daunay, J. (2018). Décarboner le bâtiment, sans oublier ses émissions indirectes. *Annales des Mines*, 90. 38-40 Repéré à <http://www.annales.org/re/2018/re90/2018-04-8.pdf>

Hydro Québec. (s. d.). L'analyse du cycle de vie à Hydro Québec. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/analyse-cycle-de-vie.html>

Inexence. (s. d.). *Fiche technique : murs poids en gabion*. Repéré à <https://www.inexence.fr/images/files/fiches-techniques/inexence-Fiche-technique-soutenement-mur-poids.pdf>

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). (2016). En juin 2016, poursuite des expériences de végétalisation innovante des plates-formes de roulement du Tram. Repéré à <http://www.dijon.inra.fr/Toutes-les-actualites/Tram-2>

Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE). (2016). Développement Durable. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1644>

Jancovici, J-M. (2003). Existe-t-il des énergies sans CO<sub>2</sub>? Repéré à <https://jancovici.com/changement-climatique/quel-monde-ideal/existe-t-il-des-energies-sans-co2/>

Jancovici, J-M. (2007). Quels sont les gaz à effet de serre ? Repéré à <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>

Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P. et Shaked, S. (2010). Principe général de l'Analyse de Cycle de Vie. Dans C. Holliger et S. Erkman (dir.), *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, (2<sup>ème</sup> édition, p. 13). Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes. Repéré à [https://books.google.fr/books?id=g9S55CkIsOoC&printsec=frontcover&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fr/books?id=g9S55CkIsOoC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

- Juran, J. (1954). *Universals in Management, Planning and Controlling*. Repéré à <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.1456&rep=rep1&type=pdf>
- Kojmane, J. et Aboutajeddine, A. (2015). Enjoyeering Senior : Un projet de conception et développement de produits innovants pour les élèves-ingénieurs. Dans *Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées*. Tanger, Maroc. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01260774/document>
- La Compagnie des Forestiers. (s. d.). Soutènement et renforcement de routes et talus en gabions. Repéré à <https://www.lacompagniedesforestiers.com/metiers-2/gabions-et-murs-de-soutenement/soutenement-routes-talus-gabions/>
- Lafarge. (2013). *Le Grand Ouest, région clé du dispositif Lafarge France*. Repéré à [https://www.lafarge.fr/sites/lafarge.fr/files/atoms/files/le\\_grand\\_ouest\\_region\\_cle\\_du\\_dispositif\\_lafarge\\_france.pdf](https://www.lafarge.fr/sites/lafarge.fr/files/atoms/files/le_grand_ouest_region_cle_du_dispositif_lafarge_france.pdf)
- Le blog de l'éco-conception. (2010). Le nouveau train d'Alstom : l'AGV. Repéré à <https://ecoconception.wordpress.com/tag/eco-transport/page/2/>
- Les cahiers du Développement Durable. (s. d.). L'éco-conception d'un produit ou d'un service. Repéré à <http://les.cahiers-developpement-durable.be/outils/eco-conception/>
- LGV Rhin-Rhône. (s. d.). Le tracé. Repéré à <http://www.lgvrheinrhone.com/la-branche-est/zoom-sur-la-branche-est/le-trace.html>
- Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, JORF 2010. Repéré à <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000693683>
- Meyer, R., Lavandier, C., Gauvreau, B. et Vincent, B. (2016). *Intégration du bruit de trafic routier dans l'analyse du cycle de vie : influence de la distance de propagation entre sources et habitations sur l'évaluation des populations exposées*. (Rapport de recherche). Le Mans, France. Repéré à <http://www.conforg.fr/cfa2016/cdrom/data/articles/000133.pdf>
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2017). Filière bois : qualités du bois et construction. <http://agriculture.gouv.fr/filiere-bois-qualites-du-bois-et-construction>
- Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. (2000). Circulaire du 15/02/00 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (BTP). Repéré à [https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/7895](https://aida.ineris.fr/consultation_document/7895)
- Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. (2016). *Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans*. Repéré à [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits\\_editoriaux/Publications/Datalab/2016/datalab-6-infrastructures-lineaires-transport-decembre2016-c.pdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2016/datalab-6-infrastructures-lineaires-transport-decembre2016-c.pdf)
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017a). Émissions des gaz à effet de serre par secteur. Repéré à <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/2082/0/emissions-gaz-effet-serre-secteur-1.html>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2016b). Énergie dans les bâtiments. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energie-dans-batiments>

- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017b). Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014. Repéré à <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2668/856/entreprises-btp-2275-millions-tonnes-dechets-2014.html>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2016a). L'éco-conception des produits. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/leco-conception-des-produits>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2016c). Recherche et développement pour l'énergie. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/recherche-et-developpement-lenergie>
- Mülberg, H., Cuennet, S., Bruühwiler, E., Hourier, B., Boudry, F. et Fleury, B. (2014). 2400m3 de BFUP sur un pont autoroutier. *Tracés*. Volume 19. 12-19. Repéré à <https://www.espazium.ch/uploads/55c9b8af43a5b.pdf>
- Natterer, J., Sandoz, J-L. et Rey, M. (2000). Matériau bois. Dans R. Walther et M. Hirt (dir.), *Traité de Génie Civil de l'École polytechnique fédérale de l'Université de Lausanne : Construction en bois* (deuxième édition, vol. 13, 21-67). Lausanne, Suisse. Repéré à : [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=lang\\_fr&id=KTfm3mnpPk0C&oi=fnd&pg=PR5&dq=essence+bois+construction&ots=NIVzDO2uPp&sig=aLPZ4Ha-ZkLactEplSyQQcsc29U#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=lang_fr&id=KTfm3mnpPk0C&oi=fnd&pg=PR5&dq=essence+bois+construction&ots=NIVzDO2uPp&sig=aLPZ4Ha-ZkLactEplSyQQcsc29U#v=onepage&q&f=false)
- Natura-Sciences. (2018a). FSC & PEFC : pour des forêts durables. Repéré à <http://www.natura-sciences.com/environnement/fsc-pefc-durable689.html>
- Natura-Sciences. (2018b). Quels sont les impacts environnementaux d'une centrale nucléaire. Repéré à <http://www.natura-sciences.com/energie/impacts-environnementaux-nucleaire.html>
- Nice-Matin. (2017). Gare de Grasse : un quai solaire ! *Nice Matin*, 25441. Repéré à <https://www.pressreader.com/france/nice-matin-grasse-pays-grassois/20171201/281547996213482>
- Normandie Aménagement. (s. d.). Tramcités. Repéré à <https://www.normandie-amenagement.com/tramcites/>
- Objectif BIM. (s. d.). Définition du BIM. Repéré à <http://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/la-definition-du-bim>
- Observatoire de la Mobilité en Ile-de-France (OMNIL). (2012). *Enquête globale transport*. Repéré à [http://www.omnil.fr/IMG/pdf/egt2010\\_enquete\\_globale\\_transports\\_-\\_2010.pdf](http://www.omnil.fr/IMG/pdf/egt2010_enquete_globale_transports_-_2010.pdf)
- Office National des Forêts (ONF). (s. d.). Les forêts, de gigantesques puits de carbone. Repéré à [http://www.onf.fr/gestion\\_durable/++oid++5ae6/@@display\\_advise.html](http://www.onf.fr/gestion_durable/++oid++5ae6/@@display_advise.html)
- Orée. (s. d.). Qu'est-ce que l'éco-conception ? Repéré à <http://ecoconception.oree.org/eco-conception-definition.html>
- Organisation internationale de normalisation (ISO). (2015). *Système de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation*. Norme internationale ISO 14001. Paris, France.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2016). Rayonnements ionisants, effets sur la santé et mesures de protection. Repéré à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/fr/>
- Paradis Bolduc, L. (2015). Produit du mois : le gabion, un remplaçant économique et écologique au béton. Repéré à <https://www.ecohabitation.com/guides/1272/produit-du-mois-le-gabion-un-remplacant-economique-et-ecologique-au-beton/>

- Plan Bâtiment Durable. (2018). *Rapport d'activité 2017*. Repéré à [http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/pbd\\_rapport\\_activite\\_2017\\_web.pdf](http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/pbd_rapport_activite_2017_web.pdf)
- Plante & Cité. (s. d.). *Essai de végétalisation pour la seconde ligne de tramway aggro Orléans*. Repéré à [https://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers\\_ressources/info/6783-3\\_TramOrleans.pdf](https://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers_ressources/info/6783-3_TramOrleans.pdf)
- Plante & Cité. (2016). *Expériences de végétalisation de plateformes de tramways en zones nord/ouest*. Repéré à [https://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers\\_ressources/experiences\\_de\\_vegetalisation\\_de\\_plateformes\\_de\\_tramways\\_en\\_zones\\_nord\\_ouest.pdf](https://www.plante-et-cite.fr/data/fichiers_ressources/experiences_de_vegetalisation_de_plateformes_de_tramways_en_zones_nord_ouest.pdf)
- Pôle éco-conception. (s. d.). L'éco-conception, les concepts. Repéré à <https://www.eco-conception.fr/static/leco-conception-les-concepts.html>
- Pôle éco-conception et Institut de développement de produits. (2014). *La profitabilité de l'éco-conception : une étude économique*. Repéré à [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport\\_profitabilite-ec-2014\\_web.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport_profitabilite-ec-2014_web.pdf)
- RECYBETON. (s. d.). Projet National RECYBETON. Repéré à <http://www.pnrecybeton.fr/>
- Ramette, Y. (2011). L'éco-conception à la RATP. Dans *Réalités industrielles* (pages 103 à 107). Eska. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles1-2011-2-page-103.htm>
- Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP). (2012). *Site de Maintenance et de Remisage de Ladoumègue*. Repéré à [http://www.amutc.fr/pdf/TRA\\_presentation\\_SMR\\_07\\_12\\_2012.pdf](http://www.amutc.fr/pdf/TRA_presentation_SMR_07_12_2012.pdf)
- Réseau Ferré de France. (s. d.a). *Livret carbone*. Repéré à [http://www.lgvrrhinrhone.com/fileadmin/user\\_upload/EST/Medias\\_site/PDF/11\\_livret\\_carbone.pdf](http://www.lgvrrhinrhone.com/fileadmin/user_upload/EST/Medias_site/PDF/11_livret_carbone.pdf)
- Réseau Ferré de France. (s. d.b). *Livret environnemental*. Repéré à [http://www.lgvrrhinrhone.com/fileadmin/user\\_upload/EST/Mediatheque/Documents/10\\_livret\\_environnemental.pdf](http://www.lgvrrhinrhone.com/fileadmin/user_upload/EST/Mediatheque/Documents/10_livret_environnemental.pdf)
- R'Mili, A., Sahli, K. et Hassis, H. (2013). Contribution des fillers calcaires et des cendres volantes à l'amélioration des résistances caractéristiques des bétons. Dans A. R'Mili, O. Limam, K. Miled et W. Ben Hassine (dir.). *Les journées nationales du béton* (34-39). Tunis, Tunisie : École nationale d'Ingénieurs de Tunis. Repéré à [https://www.researchgate.net/profile/Karim\\_Miled/project/JOURNEES-NATIONALES-DU-BETON-JNB17/attachment/582f79eb08ae5e4c8b35a622/AS:429895202414593@1479506411683/download/Actes+JNB'13.pdf#page=7](https://www.researchgate.net/profile/Karim_Miled/project/JOURNEES-NATIONALES-DU-BETON-JNB17/attachment/582f79eb08ae5e4c8b35a622/AS:429895202414593@1479506411683/download/Actes+JNB'13.pdf#page=7)
- Schmitt, L., Mai-Nhu, J., Rougeau, P., Djerbi Tegguer, A. et Saillio, M. (2015). Durabilité des structures en béton incorporant des granulats recyclés. *Conférence Internationale Francophone NoMaD, Nouveaux Matériaux et Durabilité*. Douai, France. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01289206>
- Science & Vie. (2017). On peut fabriquer du graphène avec du bois ! Repéré à <https://www.science-et-vie.com/nature-et-enviro/on-peut-fabriquer-du-graphene-a-partir-de-bois-9309>
- Sciences et Avenir. (2017). La première route solaire au monde a 1 an. Repéré à [https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/la-premiere-route-solaire-au-monde-a-1-an\\_119428](https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/la-premiere-route-solaire-au-monde-a-1-an_119428)

- Shili, S., Venet, P., Hijazi, A., Sari, A. et Lin-Shi, X. (2016). Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie. Dans *Symposium de Génie électrique*. Grenoble, France. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01361666/document>
- Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF). (2012). *Gravigny-Balizy, la première gare écodurable d'Île-de-France*. Repéré à [https://www.gares-sncf.com/sites/default/files/field\\_files/2015-01/cp-02042012-premiere-halte-ecodurable-idf.pdf](https://www.gares-sncf.com/sites/default/files/field_files/2015-01/cp-02042012-premiere-halte-ecodurable-idf.pdf)
- SNCF. (2010). *Inauguration du pôle d'échanges de Bellegarde-sur-Valserine*. Repéré à [https://www.gares-sncf.com/sites/default/files/field\\_files/2015-01/2010-20mai-bellegarde.pdf](https://www.gares-sncf.com/sites/default/files/field_files/2015-01/2010-20mai-bellegarde.pdf)
- SNCF. (s. d.). Protéger l'environnement. Repéré à <https://www.sncf.com/fr/engagements/climat/environnement#politique-energetique-4924>
- SNCF. (2017). *Rapport engagement sociétal d'entreprise*. Repéré à [http://medias.sncf.com/sncfcom/rse/bilanrse/Rapport\\_RSE.pdf](http://medias.sncf.com/sncfcom/rse/bilanrse/Rapport_RSE.pdf)
- SNCF Proximités. (2010). SNCF - Halte éco-durable de Niederbronn. Repéré à <https://vimeo.com/9317497>
- SNCF Réseau. (s. d.). Prévenir et réduire le bruit ferroviaire pour un cadre de vie préservé. Repéré à <https://www.sncf-reseau.fr/fr/a-propos/developpement-durable/environnement/reduction-bruit>
- Soli, A., Massonat, M., Moziyan, J., Courché, M., Turetti, L. et Teissedre, C. (2017). *Cannes Grasse – Dossier de Presse*. Repéré à <http://www.paysdegrasse.fr/sites/default/files/dossier-presse-sncf.pdf>
- Spinetta, J-C. (2018). *L'avenir du transport ferroviaire*. (Rapport au Premier Ministre). Repéré à [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.02.15\\_Rapport-Avenir-du-transport-ferroviaire.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.02.15_Rapport-Avenir-du-transport-ferroviaire.pdf)
- Supercondensateur. (s. d.). A propos... C'est quoi un supercondensateur ? Repéré à <http://www.supercondensateur.com/a-propos>
- Supercondensateur. (2016a). Batterie VS Supercondensateur. Repéré à <http://www.supercondensateur.com/batterie-vs-supercondensateur>
- Supercondensateur. (2015). Bus électrique à recharge la plus rapide au monde : 10 secondes grâce aux supercondensateurs. Repéré à <http://www.supercondensateur.com/bus-electrique-10-secondes-charge-supercondensateur>
- Supercondensateur. (2014). Métro de Séoul : 20% d'économie d'énergie grâce aux supercondensateurs. Repéré à <http://www.supercondensateur.com/metro-seoul-economie-energie-supercondensateurs>
- Supercondensateur. (2016b). Watt System : bus électrique à supercondensateur Made in France. Repéré à <http://www.supercondensateur.com/watt-system-bus-a-supercondensateur>
- Systra. (2016). L'expertise environnementale des projets SYSTRA présentée à la COP22. Repéré à <https://www.systra.com/fr/newsroom/article/l-expertise-environnementale-des-projets-systra-presentee-a-la-cop22>
- Systra. (s. d.). Qui sommes-nous ? Repéré à <https://www.systra.com/fr/groupe-systra/qui-sommes-nous/article/qui-sommes-nous>

- Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (UVED). (s. d.) Fonction, Unité Fonctionnelle et flux de référence. Repéré à [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_160\\_3-2-1.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_160_3-2-1.html)
- Vallet, F. (2012). *Caractérisation des bonnes pratiques en éco-conception pour la formation des ingénieurs-concepteurs : synthèse des dimensions méthodes, activités et outils*. (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Compiègne, France. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01447423/document>
- Vandeveld, J-C. (2013). Les choix de tracé des grandes infrastructures de transport : quelle place pour la biodiversité ? *Développement durable et territoires*, 4(1). Repéré à <https://journals.openedition.org/developpementdurable/9721>
- Vedura. (s. d.). Transports doux. Repéré à <http://www.vedura.fr/environnement/transports/transports-doux>
- Wattway by Colas. (s. d.). Le concept. Repéré à <http://www.wattwaybycolas.com/#concept>
- Web Trains. (2011). Le projet STEEM récomposé par le Prédit. Repéré à <http://www.webtrains.net/actualites.php?article=1000003200>
- Wignacourt, A. (2009). *Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux: application au secteur du bâtiment*. (Thèse de doctorat). École centrale de Lille, France. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00581767/document>
- Wiki Water. (s. d.). L'irrigation par hydrorétenteurs d'eau en cristaux polymères gonflants biologiques. Repéré à <https://wikiwater.fr/e55-l-irrigation-par>
- XTU Architects – MU Architecture. (2015). Biofaçades, capteur solaire biologique de demain. Repéré à : [https://issuu.com/xtu\\_architects/docs/dossier\\_de\\_presse\\_biofacades\\_symbio](https://issuu.com/xtu_architects/docs/dossier_de_presse_biofacades_symbio)
- Younsi, A. (2011). *Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales*. (Thèse de doctorat). Université de La Rochelle, France. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00717844/document>



**ANNEXE 1 : Retranscription de la conversation du 23 mars 2018 avec Maxime BAUMANN, chargé d'études éco-conception au sein du département IED de Systra.**

Maxime BAUMANN, interrogé sur la première version rédigée de la section « 1.2 Entreprendre une démarche d'éco-conception » :

« Dans les faits, le Carnet de Bord du Développement Durable (CBDD) n'est pas souvent utilisé. Il reste cependant très utile dans les cas où le maître d'ouvrage n'a pas défini de cadre quant à ses exigences en matière de développement durable pour le projet. »

« C'est au chef de projet que revient la responsabilité de s'assurer que les exigences du cahier des charges soient respectées, y compris les objectifs de développement durable et d'éco-conception. Quant à lui, le chargé d'études éco-conception doit, dans un premier temps, faire des propositions de solutions d'éco-conception au client (en argumentant sur l'intérêt environnemental, la faisabilité technique et la rentabilité économique des solutions proposées), puis une fois que celles-ci ont été acceptées, il doit faire le lien entre les différents corps de métier pour suivre la mise en œuvre des solutions d'éco-conception. »

« Parmi les techniques de conception permettant de limiter l'entretien et la maintenance en phase d'exploitation, on peut par exemple avoir recours à un enrobé en grave-bitume pour la construction des voies ou installer des dispositifs intelligents qui alerteront en cas de dysfonctionnement pour les interventions aux situations qui l'exigent. C'est notamment très pertinent pour les installations situées dans des zones difficiles d'accès (en montagne par exemple) qui nécessitent de faire intervenir des engins lourds. Au final, anticiper dès la conception permet de réduire les coûts et les impacts environnementaux de l'entretien et la maintenance en phase exploitation. »

« Systra, en sa qualité de maître d'œuvre, est libéré de la charge des infrastructures au terme de la conception. Cela signifie que le bureau d'études n'a ni obligations, ni responsabilité, ni moyen d'actions quant aux bonnes pratiques mises en œuvre en phase d'exploitation. C'est à l'exploitant des infrastructures de définir et d'appliquer une politique de développement durable. Le maître d'œuvre, Systra donc, peut bien évidemment émettre des recommandations à l'exploitant pour limiter les impacts environnementaux, mais ce n'est pas assuré que celui-ci appliquera ces recommandations, surtout si l'exploitant est différent du maître d'ouvrage. »